

Štěpán Bernáth

Řízení a synchronizace otáček BLDC motorů

Speed Control and Synchronization of BLDC Motors

Diplomová práce

Vedoucí práce:

doc. Ing. Jaromír Škuta, Ph.D.

Ostrava 2021

Biblografický záznam

Autor: Štěpán Bernáth, BER244

Název práce: Řízení a synchronizace otáček BLDC motorů

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaromír Škuta, Ph.D.

Akademický rok: 2020/2021

Počet stran: 54

Klíčová slova: BLDC motor, PIC, CAN

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

BERNÁTH, Štěpán. Řízení a synchronizace otáček BLDC motorů. Ostrava, 2021, 54 s. Diplomová práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení. Vedoucí práce Doc. Ing. Jaromír ŠKUTA, Ph.D.

Diplomová práce se zabývá problematikou řízení a synchronizace BLDC motorů. V úvodu shrnuji současný stav problematiky BLDC motorů. Po konzultaci s vedoucím práce jsem navrhl laboratorní úlohu víceúrovňového řízení dvou BLDC motorů v podobě dálkově ovládané trojkolky. Úloha je rozdělena do několika fází, které na sebe navazují. V první části diplomové práce je teoretický úvod do problematiky a jsou definovány prostředky umožňující navrženou úlohu realizovat. Poté je popsána samotná realizace hardwarové a softwarové části úlohy. Výsledky jsou shrnuty v poslední části práce. Diplomová práce obsahuje dokumentaci proběhlých měření dokazující funkčnost zvoleného řešení.

ANOTATION OF MASTER THESIS

BERNÁTH, Štěpán. Speed Control and Synchronization of BLDC Motors. Ostrava, 2021, 54 s. Master thesis. VŠB-Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Control Systems and Instrumentation. Thesis head: Doc. Ing. Jaromír ŠKUTA, Ph.D.

The master thesis deals with the control and synchronization of BLDC motors. In the introduction I summarize the current state of the art of BLDC motors. In consultation with the thesis head, I designed a laboratory task of multilevel control of two BLDC motors in the form of a remotely controlled tricycle. The problem is divided into several phases that build on each other. In the first part of the thesis, a theoretical introduction to the problem is given and the means to realize the proposed task are defined. Then the actual implementation of the hardware and software part of the task is described. The results are summarized in the last part of the thesis. The thesis contains documentation of the measurements performed, which prove the functionality of the chosen solution.

Seznam použitých značek a symbolů

ADC	Analog-digital converter, převodník spojitého signálu na digitální
BEMF	Back Electro-Motive Force, zpětná elektro-motorická síla
BLDC	Brushless DC electric motor, bezkartáčový stejnosměrný motor
CAN	Controller Area Network, typ provozní sběrnice
CPU	Central processing unit, centrální procesorová jednotka
DC	Direct current, stejnosměrný proud
ECCP	Enhanced Capture Compare PWM, mód některých pinů mikrokontroleru
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, typ paměti
EDR	Enhanced data rate, vylepšení protokolu bluetooth
I2C	Inter-Integrated Circuit, multi masterová počítačová komunikace
IDE	Integrated Development Environment, vývojové prostředí
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, druh výkonových transistorů
INT0	Interrupt 0, označení pinu nula pro externí přerušení
LED	Light-Emitting Diode, elektroluminiscenční dioda
MIPS	Million Instructions Per Second, jednotka výpočetní výkonnosti
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, výkonový transistor
PCB	Printed Circuit Board, deska plošných spojů
PWM	Pulse Width Modulation, pulzně šířková modulace
RA0	Označení pinu mikrokontroleru podle datasheetu
SPI	Serial Peripheral Interface, sériové periferní rozhraní
SRAM	Static Random Access Memory, typ polovodičové paměti
USART	Universal Synchronous / Asynchronous Receiver and Transmitter, zařízení pro synchronní nebo asynchronní komunikaci
USB	Universal Serial Bus, universální sériové rozhraní

Obsah

1	Úvod	6
2	BLDC motory	7
2.1	Charakteristika a konstrukce BLDC motoru	7
2.2	Matematický model	9
2.3	Měření polohy rotoru.....	10
2.4	Měření proudu	13
2.5	Měření teploty	15
2.6	Řízení BLDC motorů.....	16
2.6.1	Metody senzorové komutace	16
2.6.2	Metody bezsenzorové komutace.....	18
3	Synchronní řízení několika BLDC motorů.....	20
3.1	Specifikace technických a programových prostředků.....	21
3.1.1	Technické prostředky	22
3.1.2	Programové prostředky	30
3.2	Praktická realizace ovládání dvou BLDC motorů.....	36
3.2.1	Realizace řízení nejnižší úrovně 0.....	37
3.2.2	Realizace řídicí úrovně 1.....	42
3.2.3	Uživatelské rozhraní	45
3.2.4	Sestavení trojkolky	46
4	Závěr.....	49
5	Bibliografie	51

1 Úvod

BLDC motory se stávají velmi populární a jsou nasazovány do aplikací, které byly dříve výsadou motorů s mechanickou komutací. Důvodem sepsání této diplomové práce je jednak můj zájem o prostudování této problematiky a také je výhodné doplnit laboratoř katedry o funkční vzorek řídicí elektroniky pro edukační účely.

BLDC motory se liší od běžných DC motorů způsobem komutace. DC motor je komutován pomocí přiložení kartáčů, případně uhlíku tak, aby vzniklý magnetický tok dokázal motor uvést do pohybu a současně přepnul komutaci do další fáze, která udrží motor v chodu. Mechanická komutace je ale zdrojem silného elektromagnetického rušení, hluku a znečištění. Postupný vývoj elektroniky, objevy na poli výkonových tranzistorů a permanentních magnetů umožnil mechanickou komutaci převést na elektronickou. Elektronická komutace má oproti mechanické řadu výhod, například chod je mnohem tišší, elektromagnetické rušení je minimální, životnost je omezena životností elektroniky použité pro komutaci. Nevýhodou je nutné použití elektroniky, která musí být umístěna blízko motoru, zvýšení ceny motoru o elektronickou část, relativní komplikovanost komutace oproti mechanické komutaci. Navíc pokud motor není vybaven snímačem polohy rotoru, je komutace komplikovanější.

Pro bezkartáčovou komutaci je nutné sestavit elektronický obvod, který se skládá z řídicí a silové části. Řídicí část bývá osazena mikrokontrolerem, jehož program řídí průběh komutace. Mikrokontroler musí mít vlastnosti, které mu umožní řízení, jde hlavně o dostatečnou výpočetní rychlost a vybavenost perifériemi. Program mikrokontroleru musí obsahovat algoritmus komutace, jehož vhodnou podobu je nutné vybrat podle provedení motoru. V současnosti je k dispozici velké množství druhů BLDC motorů a řešení jejich komutace. Při řešení této problematiky lze vybírat z mnoha zdrojů a od mnoha výrobců. V diplomové práci budu využívat hlavně mikrokontroler PIC 18F258, který jsem měl k dispozici již připravený na desce plošných spojů spolu s dalšími komponentami umožňující komunikaci. Popisem se zabývám dále v práci. Další částí je silový obvod, jehož důležitými součástkami jsou výkonové tranzistory a gate drivers. Ty je nutné vhodně zapojit tak, aby byl chod motoru hladký a bezproblémový. Jednotlivé motory i s elektronikou pro řízení je možné skládat do větších celků, tak jak je to známé například u dronů nebo u elektrovozítek. Větší celky musí být ovšem propojeny komunikací a opatřeny vyšší vrstvou, která je řídí [1].

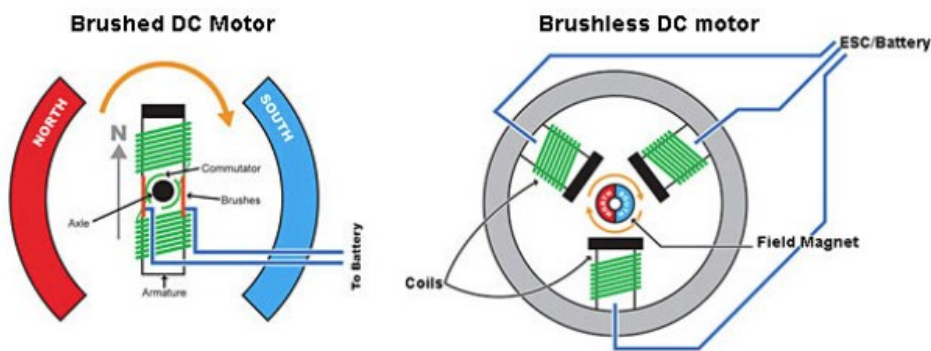
Cílem diplomové práce je návrh laboratorní úlohy, která bude realizovat synchronní řízení několika BLDC motorů, specifikaci všech prostředků, které budu potřebovat pro její realizaci, včetně konstrukce řídicí elektroniky umožňující řízení BLDC motoru osazeného hallovými senzory pro detekci polohy rotoru. Ta bude součástí uvažované úlohy a musí být připravena na propojení do většího celku pomocí komunikace. V první části diplomové práce jsem popsal samotné BLDC motory. Následuje návrh laboratorní úlohy pro řízení a synchronizaci dvou BLDC motorů a popis její realizace. V závěrečné části jsem shrnul dosažené výsledky a popsal možné další směry vývoje úlohy.

2 BLDC motory

V následujících kapitolách jsem popsal mé poznatky z oblasti BLDC motorů, které jsem získal při rešerši na toto téma. Zaměřil jsem se hlavně na diplomové a bakalářské práce českých technických vysokých škol, kde je tato oblast dobře zastoupena a je zde velké množství zdrojů.

2.1 Charakteristika a konstrukce BLDC motoru

BLDC motor patří do rodiny stejnosměrných (zvaných též DC) elektromotorů, BLDC motory jsou ale oproti běžným stejnosměrným elektromotorům komutovány elektronicky. Komutátor je mechanický přepínač proudu, který zajišťuje přepínání proudu tak, aby došlo k pohybu rotoru. BLDC komutátor mechanického typu nahradil elektronickým, rozdíl je znázorněn na obrázku 1. Z toho vyplývají výhody a nevýhody.



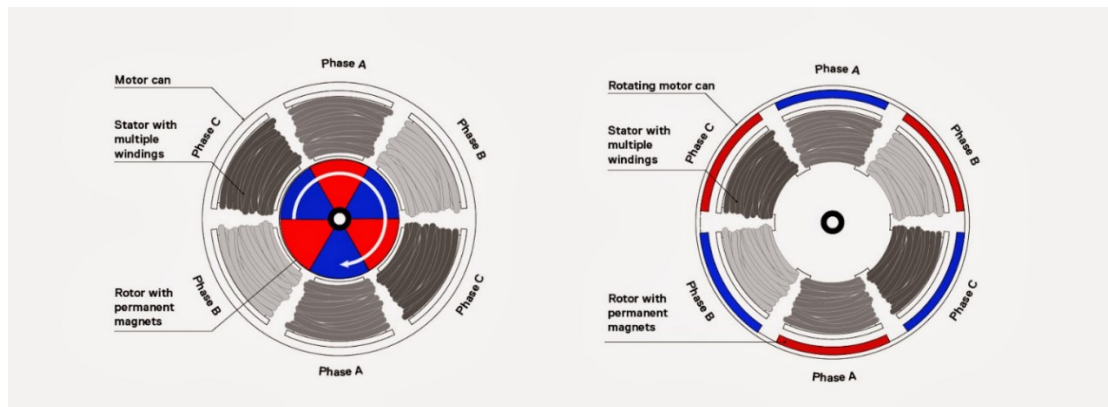
Obrázek 1 Princip komutace DC motoru a BLDC motoru [2]

Mezi nevýhody patří nutnost řídicí elektroniky, kterou je nutné umístit blízko motoru. Bez této elektroniky není motor schopen provozu a v případě selhání jakéhokoliv elektronického členu je motor neschopen provozu. S konstrukcí elektroniky a se zajištěním její spolehlivosti jsou spojené i zvýšené náklady oproti běžným komutátorovým DC motorům a ty se promítají do vyšší celkové ceny motoru. BLDC motor je citlivý na teplo a permanentním magnetům v konstrukci motoru hrozí demagnetizace. Nehodí se tedy do extrémních podmínek. Některé z typů BLDC motorů mají také potíže v oblasti nízkých otáček [3].

Výhody jsou oproti nevýhodám značné. Z principu odpadá nutnost údržby mechanické komutace a odpadají další omezení a problémy, které kartáčová komutace přináší jako je hluk, jiskření, vysoké elektromagnetické rušení. Mezi další výhody BLDC motorů patří například větší moment při stejné rychlosti, rychlá dynamická odezva, vyšší efektivita, větší životnost, větší rozsah otáček [4].

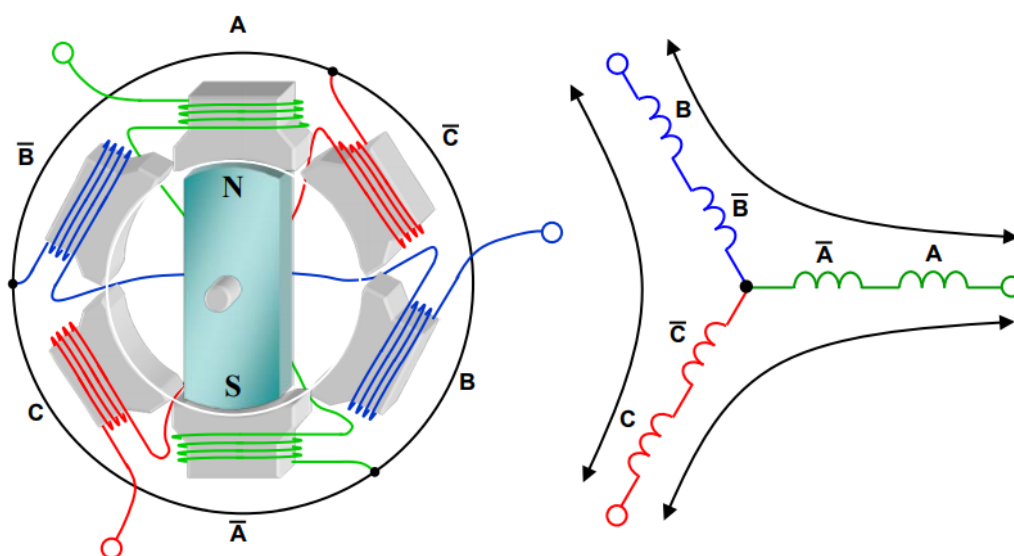
BLDC motory jsou uspořádány stejně jako klasické elektromotory, mají tedy rotor a stator. Rotor je tvořen permanentními magnety a v statoru je vinutí. Existují dva způsoby uspořádání statoru

a rotoru. První uspořádání má rotor z permanentních magnetů jako hřídel, na kterou se upíná zátěž a stator je umístěn v plášti. Toto uspořádání je vhodné pro aplikace, které nevyžadují velký moment, nebo potřebují vysoké otáčky. Uspořádání je nazýváno Inrunner. Pokud požadujeme velký moment, je vhodnější druhé uspořádání, při kterém jsou permanentní magnety umístěny v plášti, konstrukce je uspořádána tak, že hřídel je spojen s rotujícím pláštěm a je nazýváno Outrunner. Rozdíl ilustruje obrázek 2.



Obrázek 2 Typ konstrukce-vlevo Inrunner-vpravo Outrunner [5]

BLDC motory se nejčastěji zapojují do hvězdy, ale jsou možné i jiné zapojení. Zapojení do hvězdy je realizováno jako zapojení jednoho vynutí do dvou cívek na protilehlých pólových nastavcích tak, aby při průchodu proudu vytvořila oba magnetické póly, které působí na permanentní magnet rotoru. Schéma principu ilustruje obrázek 3.



Obrázek 3 Zapojení tří fází do hvězdy [6]

Cívky jsou posunuty nejméně o elektrických 60°, ale v praxi se setkáváme s více póly a posunutí je pak určeno počtem pólů. Při sepnutí další fáze dojde k posunu magnetického pole působícího na rotor a dojde k pohybu rotoru. Pokud budeme přepínání fází přesně časovat, dochází k hladkému rotačnímu pohybu, který je u motoru žádoucí. Přesné časování sepnutí fáze je podmíněno znalostí polohy rotoru. Pro zjištění polohy existuje mnoho metod, ale hlavní rozdělení je dáno přítomností senzoru polohy, které nás informuje o poloze rotoru, nebo musíme polohu rotoru zjišťovat některou z nepřímých metod.

2.2 Matematický model

S rozvojem výpočetní techniky je v dnešní době možné za určitých podmínek sestavit model elektrického motoru, kterým můžeme simulovat průběh jeho chodu. Elektrický motor představuje velmi složitý systém složený s několika podsystémů. Z hlediska matematického popisu se jedná o nelineární mnohparametrový impulzní systém, jehož analytické řešení je prakticky nemožné [7].

Analýza BLDC motoru a převod do matematického modelu je podmíněno několika předpoklady a zjednodušením, které převod umožní [3]:

- Magnetický obvod motoru není nasycen.
- Vinutí motoru má konstantní odpor, má vlastní indukčnost a vzájemnou indukčnost, odpor i indukčnost jsou konstantní.
- Všechny fáze mají stejný průběh zpětného elektromotorického napětí.
- Výkonové polovodiče jsou v obvodu ideální.
- Zanedbány jsou ztráty v kovech.
- Vířivé proudy a hysterezní ztráty jsou zanedbány.

Dynamické rovnice jsou poté následující:

$$U_a = R_a \cdot I_a + \frac{d(L_a I_a + L_{ab} I_b + L_{ac} I_c)}{dt} + E_a \quad (1)$$

$$U_b = R_b \cdot I_b + \frac{d(L_{ab} I_a + L_b I_b + L_{bc} I_c)}{dt} + E_b \quad (2)$$

$$U_c = R_c \cdot I_c + \frac{d(L_{ac} I_a + L_{bc} I_b + L_c I_c)}{dt} + E_c \quad (3)$$

Kde U_a, U_b, U_c je fázová napětí, I_a, I_b, I_c jsou fázové proudy, R_a, R_b, R_c jsou odpory jednotlivých vynutí, L_i, L_{ij} je vlastní a vzájemná indukčnost, E_a, E_b, E_c jsou elektromotorická napětí jednotlivých fází.

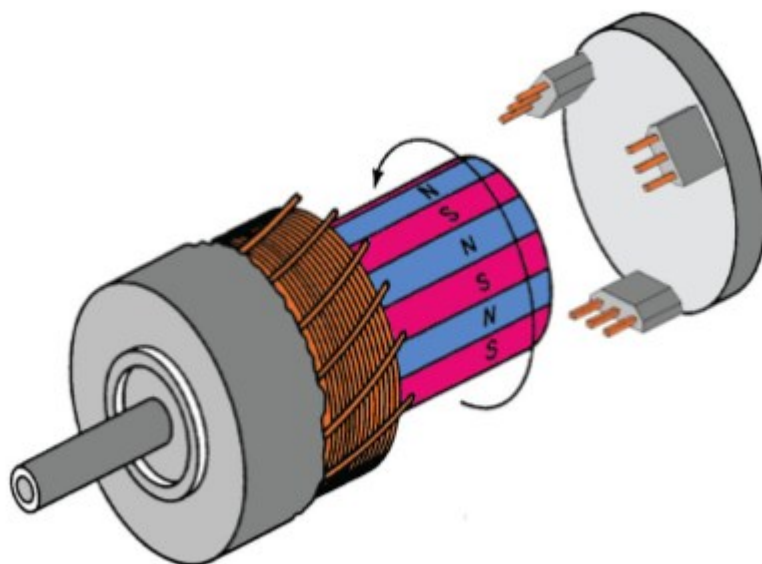
Dynamické rovnice lze dále upravovat a zjednodušit.

2.3 Měření polohy rotoru

Senzory zabudované do motoru určují možnosti komutace, celkové řízení BLDC motoru i s ohledem na bezpečnost a jsou tedy kritickou součástí BLDC motorů. Senzory obecně prošly prudkým rozvojem, který vedl k nárůstu spolehlivosti a přesnosti při současném poklesu cen. Senzory můžeme rozdělit podle účelu měření. Při řízení motoru můžeme využít informace o poloze rotoru, o velikosti protékajícího proudu fází, o teplotě motoru a směru otáčení. Při zpětnovazebním řízení BLDC motorů se bez informací o poloze rotoru neobejdeme. Tato nutnost je jednou z nevýhod BLDC motorů, na druhou stranu umožňují precizní řízení a tedy vyšší efektivitu [8]. Pro určení natočení rotoru vůči statoru jsou nejčastěji využívány senzory Hallova jevu, resolvery a encodery. Natočení můžeme ovšem určovat i bez pomoci senzorů. Je samozřejmé, že kvalita řízení se bude odvíjet od kvality a přesnosti senzorů.

Hall senzory

Senzory Hallova jevu jsou využívány už delší dobu. Jejich vývoj umožňuje motorům pracovat efektivněji a provádět komutaci přesněji. Většinou jsou rozmístěny po obvodu pláště motoru po 60 stupních. Senzory mohou být umístěny tak, že snímají polohu rotoru pomocí permanentních magnetů rotoru a nebo jsou umístěny mimo motor a snímají polohu rotoru pomocí permanentních magnetů umístěných na hřídeli mimo motor. Výhodou prvního řešení je využití permanentních magnetů rotoru, odstranění chyby při nepřesnostech instalace sekundárních magnetů a navíc je toto řešení levnější. Umístění je ukázáno na obrázku 4. Nevýhodou je teplotní ovlivňování senzorů od motoru a ovlivňování elektromagnetickým rušením motoru.



Obrázek 4 Umístění Hall senzorů v motoru [9]

Druhé řešení odstraňuje nevýhody prvního, ale je dražší. Požadavky na senzory jsou v oblasti citlivosti, která ovlivní možnou vzdálenost od permanentního magnetu, nebo při zachování vzdálenosti možnost využít slabší magnety a tím řešení zlevnit. Druhou oblastí je opakovatelnost. Tím

se myslí schopnost senzoru zachytit přechod magnetického pole v ideálním případě v ten samý čas při nekonečném opakování. Tato schopnost ovlivňuje kvalitu časování komutace. Třetí oblastí je stabilita. Je důležité, aby se parametry detekce senzoru příliš neměnily v závislosti na teplotě nebo napětí. Poslední oblastí je čas přechodu z jednoho stavu do druhého. Tento čas musí být co nejkratší a nesmí se příliš měnit při změně podmínek, například teploty [10].

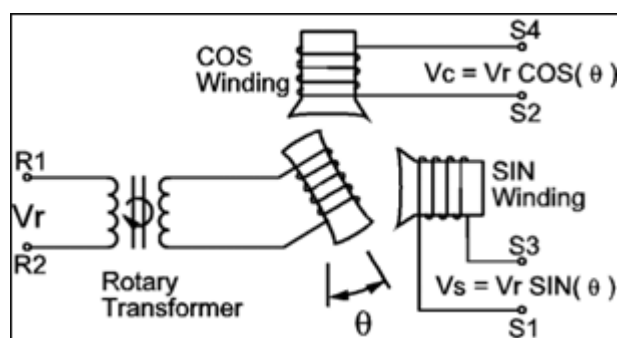
Resolver

Resolvery jsou senzory pro určování polohy rotačních součástí a jsou využívány pro detekci polohy rotoru BLDC motorů, na obrázku 5 je příklad resolveru od firmy AMCI.



Obrázek 5 Bezkontaktní resolver [11]

Jejich výhodou je určení polohy rotoru s velkou přesností a robustnost. Nevýhodou je relativní složitost implementace do EC motoru a vyšší náklady. Resolver se obvykle skládá ze tří elektromagnetů, první je umístěn ve středu rotoru a otáčí se, zbylé dva jsou umístěny na statoru a svírají úhel 90 stupňů. Umístění je na obrázku 6.



Obrázek 6 Princip resolveru [12]

Rotační elektromagnet je buzen harmonickým signálem a statorové elektromagnety přenášejí indukci tento harmonický signál v závislosti na poloze. Tento signál musí být ještě filtrován a upraven [13].

Enkodéry

Enkodéry jsou další možností, jak snímat polohu rotoru. Enkodéry mohou být optické, magnetické, kontaktní atd. Při rozhodování o typu vhodného enkodéru pro motor závisí na prostředí, ve kterém bude motor pracovat. Například optické enkodéry nejsou vhodné pro těžké průmyslové prostředí s vysokými teplotami, nebo se silnými vibracemi. Při nevhodném použití se stávají tyto senzory nepoužitelné. Enkodéry dále rozlišujeme na absolutní, které dávají informaci o absolutní poloze, nebo inkrementální, které dávají informaci o poloze pouze relativní. Inkrementální enkodéry potřebují ke své činnosti informaci o startovní pozici, ta se nastavuje většinou při startu motoru. Příkladem vzhledu enkodéru je na obrázku 7.



Obrázek 7 Analogové enkodéry firmy AMCI [11]

Optické inkrementální enkodéry mají optický disk rozdělený na průsvitné a neprůsvitné části, přes které prochází nebo neprochází světlo. Světlo se převádí na digitální signál a pomocí například čítače se určuje poloha. Absolutní optické enkodéry využívají optický disk s Grey kódem a je tak získána informace o absolutní poloze rotoru [14].

Magnetické enkodéry pracují dvěma způsoby. První způsob je navržen jako snímač Hallova jevu, který je v blízkosti magnetického kroužku. Ten je poskládán z permanentních magnetů a nasazen na hřídel. Při rotaci hřídele snímá senzor změnu magnetického pólu a výstupem je digitální signál. Při druhém způsobu je umístěn permanentní magnet na středu čela hřídele a senzor je umístěn v blízkosti magnetu na jeho čele. Senzor je složen ze 4 Hall snímačů, které poskytují analogový sinusový signál. Na základě porovnání fází se vyhodnocuje poloha rotoru [14].

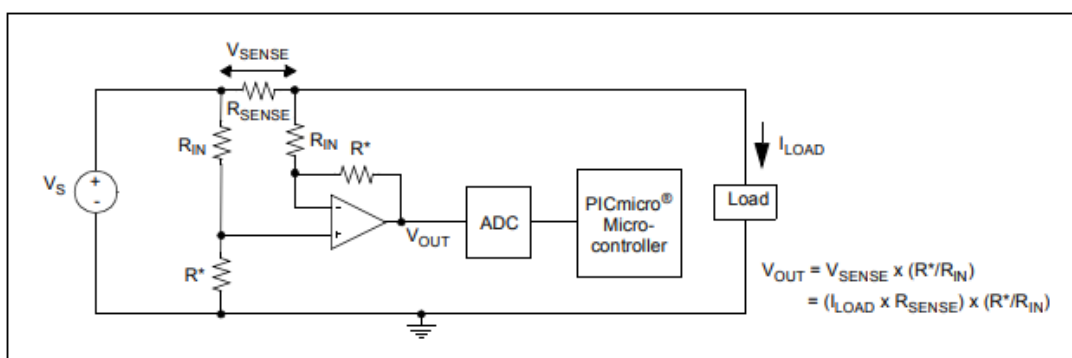
2.4 Měření proudu

Měření odběru proudu EC motoru je důležitým měřením zejména kvůli bezpečnosti okolí a motoru. Jedině na základě měření proudu můžeme poznat, jestli nastala některá z kritických situací a motor je nutno odpojit od napájení. Mezi nejběžnější metody měření proudu patří měření pomocí bočnickových rezistorů, pomocí Hall senzorů, nebo pomocí transformátorů.

Bočnickové rezistory

Měření proudu pomocí bočnickových rezistorů je oblíbenou metodou pro svou nenáročnost a nízké náklady, při zachování dostatečné přesnosti. Pro měření se využívá Ohmova zákona, kdy při známém odporu a napětí můžeme vypočítat protékající proud. Pokud je odpor rezistoru malý, není to velká zátěž pro obvod. Tato metoda je vhodná pro měření přibližně do 20 A. Rezistory pro toto řešení by měly být SMD, protože drátové rezistory jsou zatíženy příliš velkou vedlejší kapacitou. Dalším vhodným řešením je použití odporu vedení proudu a zkonstruovat určité místo v obvodu tak, aby mělo vhodné vlastnosti pro aplikaci bočnickové metody. Bočnickové metody rozdělujeme podle toho, kde je rezistor umístěn vzhledem k motoru. Bočník může být mezi zdrojem a motorem, pak hovoříme o High-side bočniku a jestliže je mezi motorem a zemí, hovoříme o Low-side bočniku.

High-side bočník může být individuálně zkonstruován, nebo může být koupen jako hotové řešení od dodavatele. Komerční řešení bývá konstruováno jako zapojení s operačním zesilovačem a má své parametry dané v datasheetu včetně tolerancí. Výhodami High-side bočniku je menší elektromagnetické rušení v obvodu, detekce nadproudu je velmi rychlá. Nevýhodou je použití operačních zesilovačů, které jsou konstruovány pro vyšší napětí a použití velmi přesných rezistorů s malou tolerancí. Na obrázku 8 je příklad zapojení rezistorového bočniku High-side.



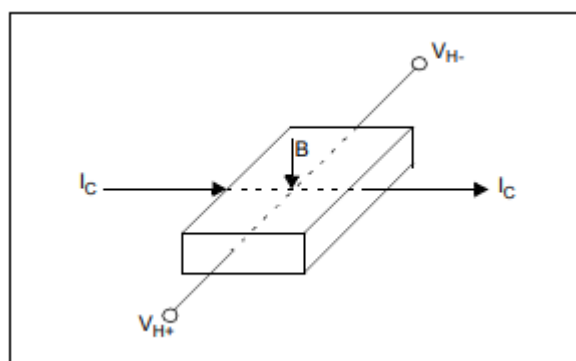
Obrázek 8 Rezistorový bočník High-Side [8]

Low-side bočník je zapojen za motor a může být tak jako High-side bočník koupen jako komerční řešení. Výhodou tohoto řešení je použití nízkonapěťových operačních zesilovačů, operační

zesilovače mohou být zapojeny jako neinvertující. Nevýhodou je přerušení cesty proudu k zemi a neschopnost měřicího obvodu detekovat nové uzemnění, které vzniklo při nehodě [8].

Hall senzory

Hall senzory pro měření proudu jsou v dnešních aplikacích čím dál více používány pro svou jednoduchost, přesnost a možný rozsah měření od mA do tisíce A. Většímu rozšíření bránila vysoká cena, která ale stále klesá. Princip Hallova jevu je velmi dobře znám – využívá se toho, že při průchodu proudu magnetickým polem vzniká na vodiči příčně napětí. To lze využít při měření velikosti proudu protékajícího vodičem. Princip Hallova jevu je na obrázku 9.



Obrázek 9 Princip Hallova jevu. [8]

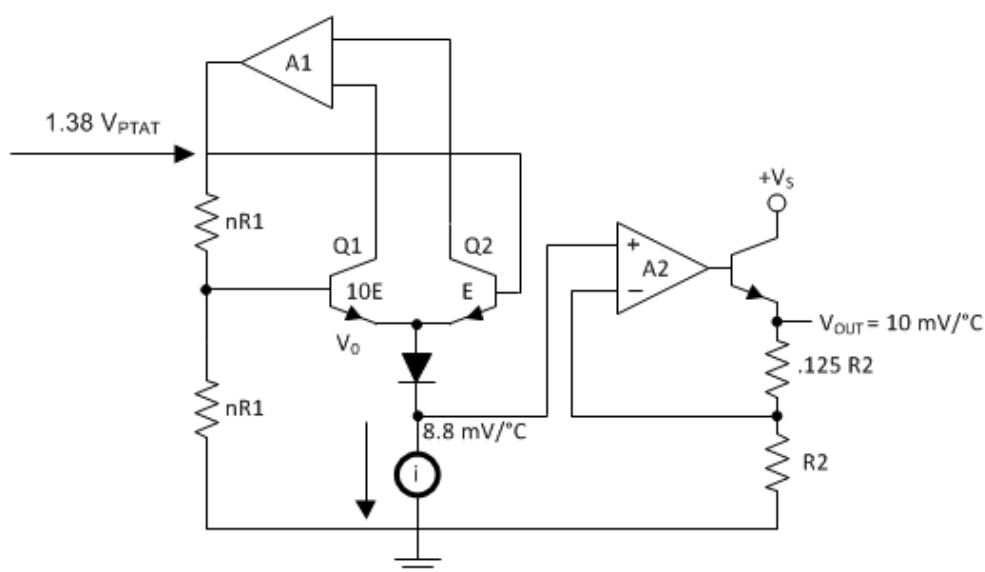
Hall senzory jsou dvojího provedení, buď open-loop nebo close-loop. Close-loop mají výhodu lepší linearity a jsou schopny měření ve větším rozsahu. Hall senzory jsou vyráběny v různých pouzdrech, tak aby byla umožněno umístění v různých aplikacích. Běžné je umístění v deskách plošných spojů. Nevýhodou Hall senzorů je citlivost na vnější magnetické pole a citlivost na teplotu. Citlivost na teplotu se řeší zavedením tepelných kompenzací [8].

Transformátorové měření proudu

Měření proudu transformátorově je alternativou k měření proudu bočnickem a Hall senzory. Transformátor obsahuje primární a sekundární vinutí, přivedením proudu na primární vinutí se bude indukovat proud na sekundárním vinutí v definovaném poměru. Proud je možno na sekundárním vinutí dále změřit bočnickovou metodou. Transformátorové měření proudu se zavádí tam, kde potřebujeme měřit velké hodnoty proudů. Výhodou této metody je galvanické oddělení od měřeného proudu a jeho celková robustnost. Nevýhodou může být riziko magnetického nasycení jádra a relativně větší konstrukční velikost [8].

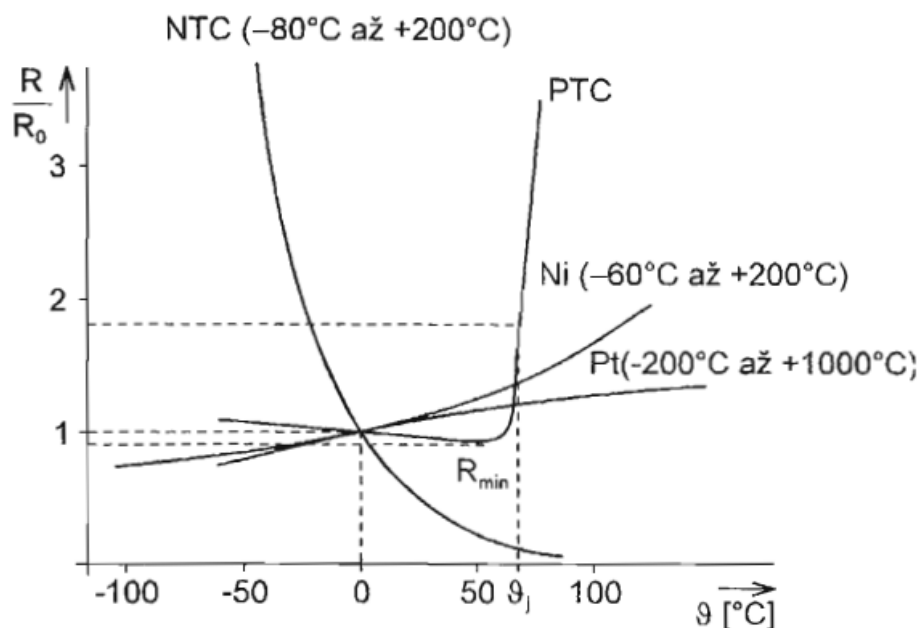
2.5 Měření teploty

Měření teploty je důležité, protože vliv teploty na elektroniku i samotný BLDC motor je negativní. Je tedy vhodné znát hodnotu teploty na kritických místech, kterými mohou být stator a elektronika řízení. Teplotu můžeme měřit známými metodami a senzory, které se pro aplikaci do BLDC motoru hodí. Nejčastěji můžeme vidět použití digitální teploměru, nebo termistorů. Digitální teploměr je nenáročná elektronická součástka, která je připravena pro okamžitou aplikaci, nebo připojení do měřicího řetězce podle doporučeného zapojení v datasheetu. Výstupem je kalibrované napětí, které je možné snímat a pouze přepočítat na teplotu [15]. Nevýhodou je fakt, že se jedná o elektronickou součástku, která je citlivá na elektromagnetické rušení. Princip zapojení je znázorněn na obrázku 10.



Obrázek 10 Schéma digitálního senzoru teploty [15]

Druhou možností je použití termistorů. To jsou elektrotechnické součástky, které mají odpor závislý na teplotě. Termistory se dělí na pozitivní (PTC) a negativní (NTC) podle závislosti odporu na teplotě. Křivku závislosti je možno vidět na obrázku 11. Výhodou termistorů je jejich necitlivost vůči ostatním vlivům kromě teploty. Nevýhodou je nelineární průběh odporu v závislosti na teplotě [16]. Výpočet teploty je nutno provést v elektronickém obvodu, nebo v mikrokontroleru. To znamená buď zvýšený náklad na elektronický obvod, nebo zablokování části výpočetní kapacity pro výpočet teploty. V jednoduchých BLDC motorech se měření teploty neprovádí, předpokládá se, že náklady na zabudování senzoru teploty převyšují výhody.



Obrázek 11 Teplotní charakteristiky termistorů [16]

2.6 Řízení BLDC motorů

Základní metody komutace BLDC motorů vycházejí z konstrukce konkrétního typu motoru. Metody lze sice použít za určitých podmínek i na jiný typ konstrukce, ovšem vždy je to vykoupeno zhoršením některého z parametrů metody nebo motoru, většinou se sníží efektivita motoru. Provedení komutace je podmíněno detekcí polohy rotoru v okamžiku komutace, proto lze základní metody rozdělit podle toho, jakým způsobem detekujeme polohu rotoru vůči statoru. Polohu můžeme detekovat pomocí senzorů, nebo některou z nepřímých metod využívající příslušné fyzikální jevy, které při provozu motoru vznikají a jsou vhodné pro detekci polohy rotoru, jako jsou elektromagnetický jev, nebo velikost proudu protékající fází rotoru [4].

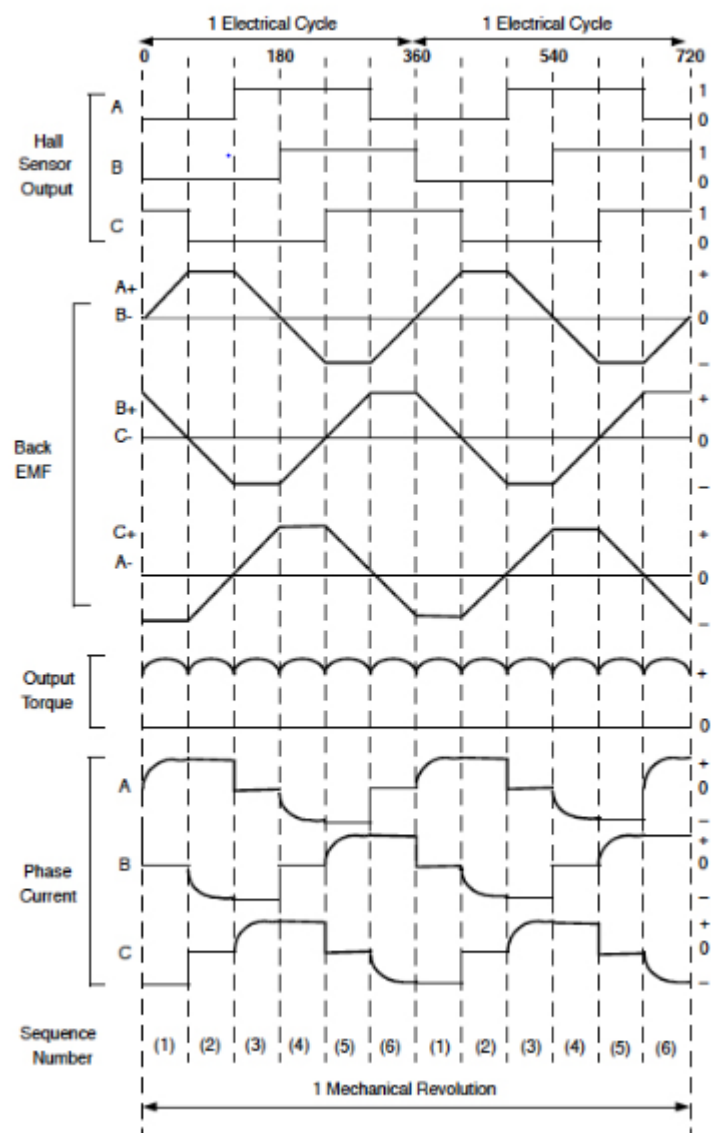
2.6.1 Metody senzorové komutace

Metody založené na elektronické komutaci pomocí senzorů polohy jsou obecně jednodušší, protože detekce polohy nám dovoluje celý proces komutace zjednodušit. Velikost zjednodušení je ovšem závislá na druhu a kvalitě senzorů pro určení polohy.

Metoda Six-step komutace

Jedná se o nejčastěji používanou metodu komutace BLDC motorů. Metoda je založena na sepnutí dvou ze tří (A, B, C) fází současně, fáze A je napájena kladně, fáze B záporně, v dalším kroku se napájení změní pouze na záporné fázi z B na C, v dalším kroku se změní napájení jak kladné fáze, tak i záporné. Spínání probíhá podle tabulky, která zajišťuje správné pořadí sepnutí fází. Příklad takové tabulky je vidět na obrázku 12. Aby proběhlo sepnutí po celém obvodu, je nutné provést šest kroků vystřídání fází – odtud název metody. Sepnutí fází je řízeno pomocí detekce

polohy. Ta může být prováděna pomocí senzorů polohy, nebo může být i bezsenzorová. Při této metodě je totiž vždy jedna z fází nenapájena a na této fázi je možno změřit indukovaný proud. Toho se využívá právě při bezsenzorovém řízení otáček BLDC motoru.



Obrázek 12 Princip Six-step komutace [9]

Tato metoda komutace může být aplikována tam, kde můžeme akceptovat největší nevýhodu této komutace, a to je zvlnění momentové charakteristiky. Jak je vidět na obrázku 12 je zvlnění poměrně výrazné, a proto se tato metoda používá například u větráků, modelářských motorků atd [3].

Metoda vektorového řízení komutace (Field Oriented control)

Jedná se o metodu komutace, která je založená na řízení signálů v každém časovém okamžiku vzorkovací frekvence a tím polohy rotoru. To ale znamená vyšší výpočetní náročnost a s tím spojené nároky na řídicí elektroniku. Výhodou je hladká momentová křivka, vyšší moment v otáčkách, odstraňuje problémy s řízením v nízkých otáčkách a při brždění.

Výpočet se provádí pomocí transformací, které výpočet zjednodušují z třífázového na dvojfázový pomocí Clark a Parkovy transformace. Po provedení příslušných výpočtů se inverzí transformací získá řídicí veličina [17].

Metoda sinusových proudů

Metoda je založena na generování sinusového průběhů proudů pro všechny tři fáze. Je vhodná pro BLDC motory, které jsou konstruovány tak, aby b-EMF bylo sinusového průběhu (PMSM). Sinusová komutace se provádí kvůli úspoře výpočetní kapacity pomocí výpočtu jedné sinusové vlny a ostatní dvě vlny se dopočítávají jen jako fázové posunutí první vlny. Pokud nejsme omezeni výpočtovou kapacitou, lze výpočet provádět pro každou vlnu zvlášť. Sinusovou komutaci nelze použít u bezsenzorových motorů, protože se pro komutaci využívají všechny fáze motoru. Problematické jsou i Hall senzory pro detekci polohy rotoru, protože informace z nich jsou k dispozici pouze v momentech změny stavu, většinou tedy třikrát za elektrickou otáčku. V mezích se provádí komutace bez znalosti polohy na základě extrapolace. V případě sinusové komutace platí, že informace o poloze by měla být co nejpřesnější, v opačném případě dochází k nepřesnostem při řízení BLDC motoru a ke zvlnění momentové charakteristiky. Momentová charakteristika sinusové komutace je ovšem mnohem hladší, než u metody Six-step komutace [18] [19].

2.6.2 Metody bezsenzorové komutace

Bezenzorová komutace je metoda využívající nepřímé metody detekce polohy rotoru. K tomu vedou různé důvody, například velikost BLDC motoru nedovoluje umístit senzory do těla motoru, nebo by umístění neúměrně zvedlo cenu. To platí hlavně u resolverů a enkodérů, které jsou objemné a drahé. Mezi nevýhody této metody patří špatná detekce polohy rotoru při nízkých otáčkách a problematické roztáčení motoru z nulových otáček. Protože je bezsenzorová metoda levná, je rozvíjena i přes problémy s ní spojené. Existuje mnoho způsobů, jak detekovat polohu rotoru bez jeho přímého snímání, ale popíšu jen dvě hlavní.

Metoda detekce indukovaného napětí

Metoda detekce indukovaného napětí je nejjednodušší. Podstata je ve snímání indukovaného napětí na nekomutované fázi a v momentě jeho nulové hodnoty je detekována poloha rotoru. Moment komutace je pak jen otázkou výpočtu zpoždění po průchodu nulou. Překážkou pro tuto metodu je nemožnost měření indukovaného napětí, jestliže není v motoru vyvedena svorka pro nulové napětí. Tato překážka je odstraněna výpočtem takzvané virtuální nuly. Existují ovšem

techniky, které výpočet virtuální nuly nepotřebují a měření se vztahuje k uzemnění [20]. Další překážkou je řízení při rozběhu a při nízkých otáčkách. V těchto případech je indukované napětí příliš nízké a nelze ho rozlišit od šumu a je nutné přejít do ovládání bez zpětné vazby. Další nevýhoda je nepřesnost řízení při časté akceleraci a brždění. V případě hmotných motorů se tato nepřesnost dá zanedbat, ovšem v případě mikromotorů jde o významnou nevýhodu [21]. Metoda se využívá pro řízení BLDC motorů, které jsou nasazeny v nenáročných aplikacích, kde se nepožadují časté změny v otáčkách a časté rozběhy, jako například ventilátory, čerpadla apod. Metoda může být modifikována pro výpočet momentu komutace technikou integrace. Technika je založena na výpočtu doby zpoždění pro komutaci pomocí integrálu. Výhodou techniky je odolnost vůči šumu a automatické přizpůsobení času komutace při změně rychlosti otáčení [21].

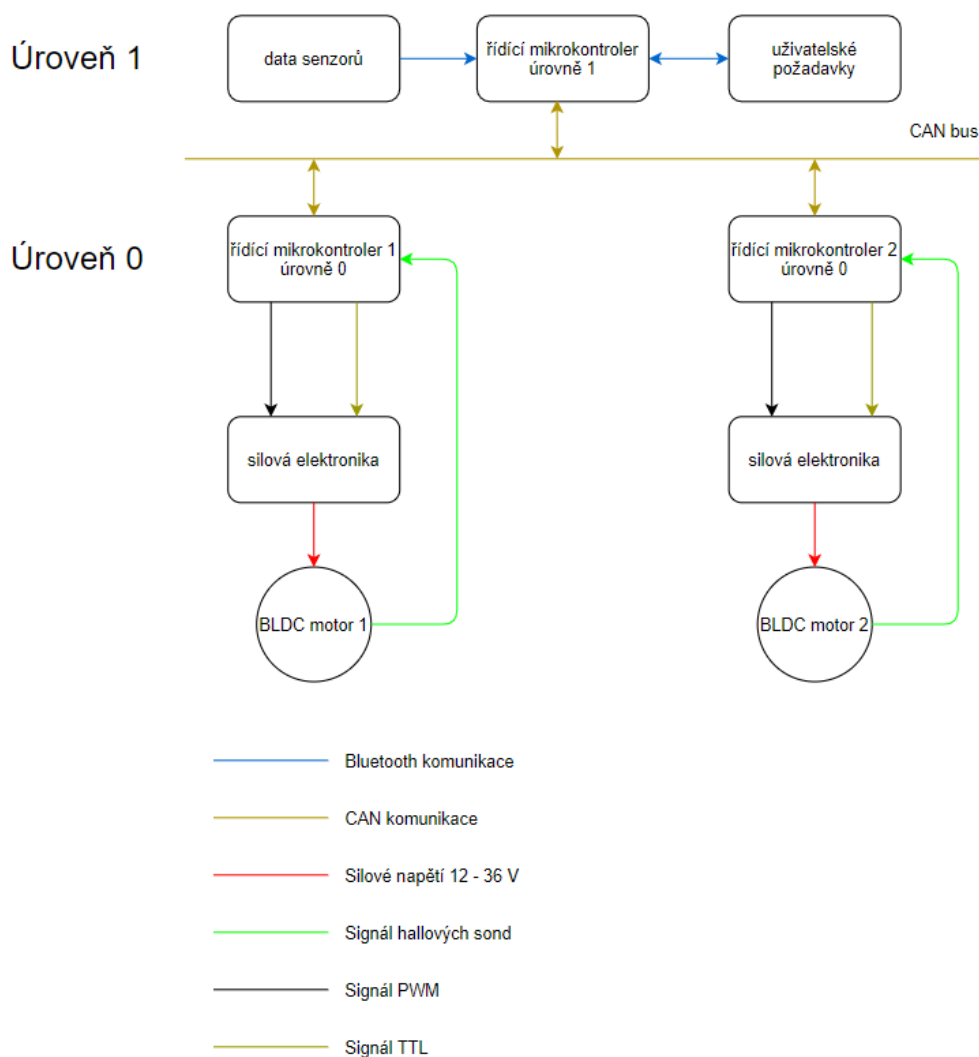
Detekce třetí harmonické složky

Další způsob pro získání informace o času komutace je detekce třetí harmonické složky indukovaného napětí a její integrace. Metoda využívá faktu, že při pohybu rotoru zapojeného do hvězdy jsou vyšší harmonické složky potlačeny a třetí harmonická je dominantní. Navíc je závislá na otáčení rotoru a proto ji lze využít pro detekci času komutace. Metoda určí čas komutace pro všechny fáze bez rozdílu, proto je nutné metodu doplnit o detekci průchodu nulou alespoň jedné fáze, abychom mohli určit pro kterou fázi proběhne komutace. Existuje několik metod pro získání třetí harmonické, například připojením paralelní rezistorové sítě zapojené do trojúhelníku získáme nulový bod a mezi nulovým bodem a středem vinutí BLDC motoru můžeme měřit třetí harmonickou [22].

Existuje mnoho dalších rozpracovaných technik, jak určit čas komutace bez senzorů určujících polohu rotoru. Namátkou třeba metoda detekce proudu procházející zpětnou diodou, metody založené na PWM strategiích, metody využívající pozorovatele, metody s použitím neuronových sítí atd [22].

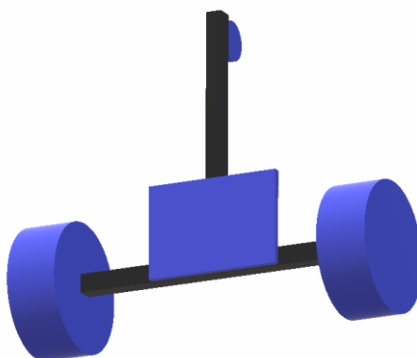
3 Synchronní řízení několika BLDC motorů

Úloha realizuje řízení minimálně dvou BLDC motorů. Řízení se skládá ze dvou úrovní, první úroveň řídí samotný BLDC motor, obsahuje výkonovou elektroniku a řídicí mikrokontrolér, který je schopen komunikovat s vyšší úrovní. Druhá úroveň se skládá z mikrokontroléru řídícího nižší úroveň na základě definovaných proměnných a případných dat z periférií, které jsou definovány. Samotné řízení bude záviset na zadání, může se jednat o samostatné řízení, kdy mikrokontrolér řídí motory samostatně na základě dat například z akcelerometru. V tom případě mikrokontroler musí být schopen regulace [23]. Druhá možnost je řízení na základě požadavků přijatých externě, jednalo by se například o pohon trojkolového vozítka umožňující zatáčení. Třetí možností je kombinace prvních dvou, příkladem může být dvojkolové vozítko schopné udržet rovnováhu a zároveň se pohybovat podle zadaných příkazů, typickým příkladem je howerboard [24]. Jednu z možností uspořádání zobrazuje obrázek 13.



Obrázek 13 Víceúrovňové řízení BLDC motorů

Mnou realizovaná laboratorní úloha bude mít podobu trojkolového vozítka se dvěma poháněnými koly umožňující pohyb vpřed, vzad a zatáčení vlevo a vpravo. Uspořádání je znázorněno na obrázku 14.



Obrázek 14 Trojkolové vozítko

Řízení bude mít dvě úrovně, v úrovni 0 bude obsažen mikrokontroler umožňující řízení BLDC motoru a silová část nutná pro chod motoru. V úrovni 1 bude mikrokontroler propojený komunikační sběrnicí CAN s úrovní nula. Sběrnice bude umožňovat sběr dat z úrovně 0 a zároveň posílat příkazy na úroveň 0. Struktura předávaných informací je v tabulce 1. Úroveň 1 bude komunikovat s uživatelem pomocí rozhraní, které bude realizováno dálkovým ovladačem. Ten se bude skládat z joysticku připojeného k Arduino Uno. Komunikace bude realizována pomocí bluetooth modulu.

Tabulka 1 Struktura CAN dat

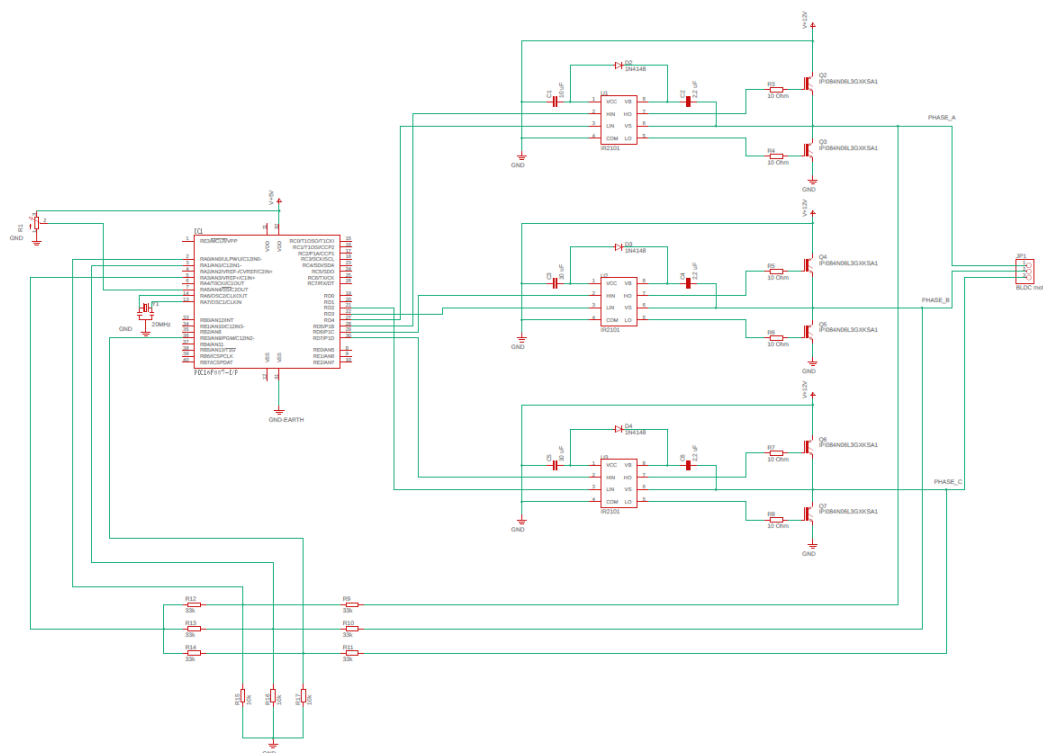
	střída	směr	rychlost
	Byte0	Byte1	Byte2
Tx_Data úroveň 0	Ano	Ano	Ano
Tx_Data úroveň 1	Ano	Ano	Ne

3.1 Specifikace technických a programových prostředků

Pro tuto úlohu jsem měl od vedoucího mé práce k dispozici některé komponenty, které budou použity a výběr ostatních komponent je tedy přizpůsoben už daným komponentám. Ostatní komponenty jsem vybíral podle svého uvážení na základě rešerší řešení a následných výpočtů. Kapitulu jsem rozdělil na dvě části, jedna se zabývá technickými prostředky a druhá programovými prostředky.

3.1.1 Technické prostředky

V kapitole jsou zahrnuty komponenty elektronické části projektu, které nesouvisí z programováním. Hardwarové komponenty související s programováním jsou popsány v následující kapitole. Pro řízení BLDC motoru je nutná silová část, která bude řízena mikrokontrolerem, provede samotnou komutaci a umožní tedy pohyb motoru. Při sestavení silové části jsem vycházel z jednoduchého schématu, který je na obrázku 15 [25].



Obrázek 15 Schéma zapojení BLDC motoru s PIC16F887 [25]

Toto schéma je pro BLDC motor bez hallových sond a využívá pro komutaci BEMF, není tedy pro mě použitelné bez zásadních úprav, které se ale netýkají zapojení kolem mosfet tranzistorů. To vychází z datasheetu pro gate driver IR2101. Toto schéma mi posloužilo jako základ pro mou práci, schéma jsem poté modifikoval na základě postupu práce a získaných vědomostí.

Kolo poháněno BLDC motorem

Jedná se o kolo, které je používáno jako pohon kolonožky. Napájecí napětí je 36 V, maximální výkon je 350 W a maximální zatížení je 120 kg. Motor je vybaven Hallovými sondami umožňující jednoduché řízení. Kolo je znázorněno na obrázku 16.



Obrázek 16 BLDC kolo

Mikrokontroler PIC18F258

Pro řízení v obou úrovních byl vybrán mikrokontroler PIC18F258 firmy Microchip. Jedná se o 8-bitový mikrokontroler z rodiny PIC 18F, která je vylepšenou verzí rodiny 16F. Vylepšení spočívá v rychlejší zpracování operací, které dosahují hodnot 12 MIPS (milionů operací za sekundu), je konstruována se specializovanými perifériemi například pro řízení třífázových motorů, může být osazena až 8 PWM výstupy, 8 nebo 10 bit ADC s rychlostí převodu až 200 ksps. Mikrokontrolery z této rodiny mohou mít i modul ECCP známý z rodiny 16F, tři interní komparátory a komunikační rozhraní umožňující komunikaci USART, SPI, I2C, CAN a USB. Konkrétní specifikace PIC18F258 je v následující tabulce 2 [26].

Tabulka 2 Základní údaje pro PIC 18F258 [26]

Typ paměti	Flash
Velikost paměti (KB)	32
Rychlost CPU (MIPS)	10
SRAM (B)	1536
Velikost EEPROM (byte)	256
Komunikační periférie	1-UART (2Rx buffer), 1-SPI, 1-I2C1
PWM periférie	1-CCP, 10-bit
Časovač	1 x 8-bit, 3 x 16-bit
ADC vstup	10-bit, 5 kanálů
Počet CAN modulů	1 CAN, full CAN 2.0B Active 3Tx Buffers
Teplotní rozsah použití (°C)	-40 až 125
Rozsah provozního napětí (V)	2 až 5,5
Počet pinů	28

Obrázek 17 Schéma zapojení PIC18F258 na PCB katedry

Gate driver IR2101

Tabulka 3 Základní údaje IR2101 [27]

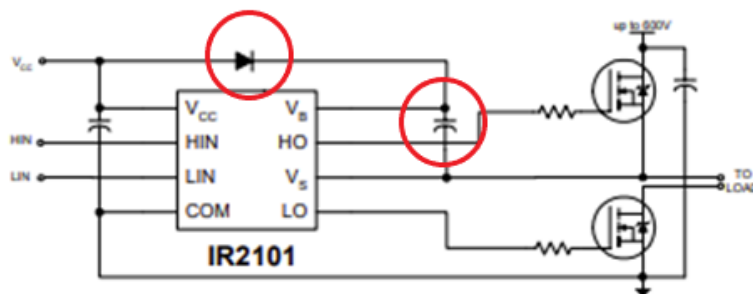
Parametr, který je nutný vypočítat, je čas přepnutí. Jestliže je uvažovaná frekvence PWM 10 kHz při střídě 1% je čas pro přepnutí [3] [28]:

$$t_{střída} = \frac{1}{10000} \div 100 = 1 \mu s \quad (4)$$

Pokud budu chtít nabíjet okolní kondenzátory za třetinový čas, je nutné výsledek dělit třemi.

$$t_{přepnutí} = 0,000001 \div 3 = 333 \text{ ns} \quad (5)$$

Podle parametrů gate driveru z tabulky je čas přepnutí 160 ns, což je pro mou aplikaci dostačující. Typické zapojení je na obrázku 18. V celém zapojení existují ještě další součástky, které je nutné doplnit, jako je bootstrap dioda a bootstrap kondenzátor.



Obrázek 18 Schéma zapojení IR2101 [27]

Dioda KA206

Jedná se o diodu pro velmi rychlé spínací obvody o malých výkonech. Dioda je součástí obvodu pro detekci změny stavu hallových sond. Dioda má parametry shrnuty v tabulce 4.

Tabulka 4 Základní údaje KA206

Opakovatelný špičkový propustný proud	75mA
Opakovatelné špičkové závěrné napětí	50 V
Celkový ztrátový výkon	200 mW
Mezní teploty okolí	-65 až 125 °C
Neopakovatelný špičkový propustný proud	250 mA
Čas přepnutí	4 ns

NAND hradlo 74HC00N

Hradlo je součástí obvodu pro detekci změny stavu hallových sond. Jedná se o součástku, které má zabudovány 4 NAND hradla po dvou vstupech. Důležitým faktorem je tady čas přepnutí, který se odvíjí od rychlosti otáčení kola. Pro tento obvod je čas přepnutí typicky 1.67 ns na 1 V, při vstupním napětí tedy 8,35 ns, což je dostatečné. Základní typické údaje jsou shrnuty v tabulce 5 [29].

Tabulka 5 Základní údaje 74HC00N

Napájecí napětí	5 V
Teplota okolí	-40 až +125 °C
Čas přechodu mezi úrovněmi na 1 V	1,67 ns
Vstupní kapacita	3,5 pF
Maximální ztrátový výkon	500 mW

AND hradlo 7408N

Hradlo je součástí obvodu pro detekci změny stavu hallových sond. Součástka se 4 hradly AND po dvou vstupech. V mém návrhu umožňuje řízení gate driveru pomocí PWM. Obvod bylo nutné zařadit, PIC18F258 neměl dostatečný počet pinů, které generují PWM. Výběr součástky byl podřízen parametru času přepnutí mezi stavy Low a High. Typické parametry jsou v tabulce 6 [30].

Tabulka 6 Základní údaje 7408N

Napájecí napětí	5 V
Teplota okolí	0 až +70 °C
Čas přechodu mezi úrovněmi	17,5 ns
Maximální výstupní proud	16 mA

Dioda 1N4148

Jedná se o standartní silikonovou signální diodu, oblíbenou pro svou dlouhou životnost. Je schopna pracovat až do frekvence 100 MHz s časem pro zotavení 4 ns. V následující tabulce 7 jsou základní údaje [31].

Tabulka 7 Základní údaje 1N4148 [31]

Špičkové reversní napětí (V)	100
Dopředný průměrný proud (mA)	200
Výkonová ztráta (mW)	500
Maximální teplota (°C)	200
Dopředná napěťová ztráta (V)	1
Proudová ztráta při 20 V a 150°C (uA)	50

Reverzní průrazné napětí (V)	100
Kapacita (pF)	4
Čas pro zotavení (ns)	4

Mosfet IPI084N06L3GXS1

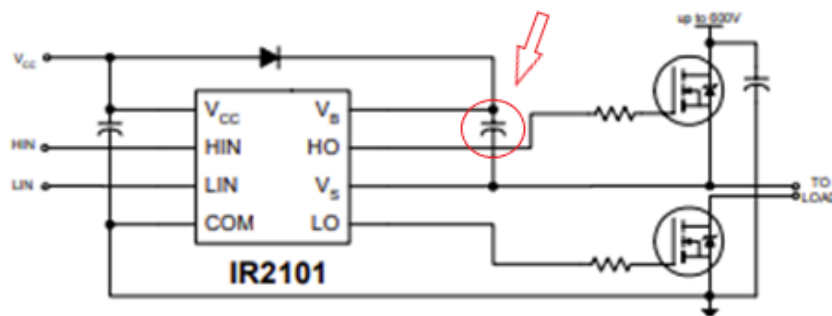
Mosfet tranzistor je určen pro širokou škálu aplikací od usměrňování ve spínaných zdrojích, řízení motorů, pro použití v solárních inventorech atd. MOSFET jsem vybral pro jeho vlastnosti, které jsou shrnuty v následující tabulce 8 [32].

Tabulka 8 Základní údaje MOSFET IPI084N06L3GXS1 [32]

Kontinuální proud drain (A)	50
Špičkový proud (A)	200
Napětí pro gate (V)	+ - 20
Výkonová ztráta (W)	79
Rozsah pracovních teplot (°C)	-55 ...175
Průrazné napětí (V)	60
Proudová ztráta (nA)	100
Vstupní kapacita (pF)	4900
Spínací čas (ns)	15
Čas vzestupné hrany (ns)	26
Čas vypnutí (ns)	37
Čas sestupné hrany (ns)	7
Celkový čas cyklu (ns)	85
Celkový náboj (nC)	29
Výstupní náboj (nC)	45
Dopředné napětí reverzní diody (V)	1,2
Zotavovací čas (ns)	40
Zotavovací náboj (nC)	39

Bootstrap kondenzátor

Kondenzátor je umístěn u gate driveru a jeho účel je vytvořit potřebné napětí pro otevření MOSFET. Umístění bootstrap kondenzátoru je znázorněno na obrázku 19.



Obrázek 19 Umístění bootstrap kondenzátoru [27]

Z principu zapojení MOSFET vyplývá, že k otevření gate je potřebné vyšší napětí, než je napětí na drain. Existují dvě možnosti, jedna je zapojení externího napájení, druhou je využití zapojení bootstrap. Toto zapojení je znázorněno na obrázku 19. Pro toto zapojení jsou klíčové dvě součástky, dioda, kterou jsem již popsal a bootstrap kondenzátor. Velikost jeho kapacity je nutno vypočítat. Budu počítat podle vzorce [33] [16]:

$$C \geq \frac{2 \left(2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \right)}{V_{cc} - V_f - V_{LS} - V_{Min}} = \frac{2 \left(2 \cdot 29 + \frac{55}{10000} + 12 + \frac{0,05}{10000} \right)}{36 - 1 - 3,8 - 30} = 116,75 \text{ nF} \quad (6)$$

Kde Q_g je celkový náboj gate (datasheet IPI084N06L3GXKSA1), $I_{qbs(max)}$ klidový proud v plovoucí části (datasheet IR2101), f je pracovní frekvence mosfetu, Q_{ls} je náboj pro změnu úrovně (datasheet IPI084N06L3GXKSA1), $I_{Cbs(leak)}$ je ztrátový proud bootstrap kondenzátoru (datasheet kondenzátoru), V_{cc} je napětí na drain mosfetu, V_f je dopředné napětí na bootstrap diodě (datasheet 1N4148), V_{LS} je úbytek napětí na mosfet při otevření (datasheet IPI084N06L3GXKSA1), V_{Min} je minimální napětí pinem V_b a V_s . Vypočtenou hodnotu jsem zvětšil 15krát pro dostatečnou rezervní kapacitu:

$$C_{celk} = 116,75 \cdot 15 = 1750 \text{ nF} \quad (7)$$

Z výpočtu vyplývá, že velikost 2,2 uF, která je nejbližší v řadě, je vyhovující.

Arduino Uno

Arduino je velice známá platforma hojně využívaná k edukačním účelům. Je pokračovatelem hlavní vývojové linie desek s názvy Extreme, NG, Diecimila a Duemilanove. Procesorem je ATmega328 a má port pro USB. Z této desky se vyvinuly další dvě speciální a to Arduino Ethernet, která má stejnou výbavu jako Uno, ale místo USB používá ke komunikaci ethernetou přípojku. Druhou je Arduino Bluetooth, ta používá místo USB Bluetooth. Arduino Uno má 14 digitálních vstupních / výstupních pinů (z nichž 6 lze použít jako výstupy PWM), 6 analogových vstupů, 16 MHz křemíkový krystal, USB připojení, napájecí konektor, záhlaví ICSP a tlačítko reset. Vše potřebné k podpoře mikrokontroleru je už na základní desce; jednoduše jej můžeme připojit k počítači pomocí kabelu USB nebo ho napájíme pomocí adaptéru AC nebo baterií. Deska Uno a verze

1.0 Arduino Software (IDE) byly zvoleny jako referenční verze desek Arduino, které se vyvíjely dále na novější verze. Deska Uno je první ze série desek Arduino s USB.

Bluetooth modul HC-05

Modul umožňuje mikrokontroleru posílat a přijímat data pomocí bluetooth rozhraní. Vzdálenost od dalšího bluetooth rozhraní je maximálně 10 metrů. Zde jsou základní údaje:

- Čipy: 29LV800, BC417
- Verze firmwaru: 3.0
- Bluetooth verze: V2.0+EDR
- Základní přenosová rychlost: 9600,8,1,n.
- Integrovaná anténa.
- Dosah max.10m
- IO napětí: 3.3V
- Vstupní napětí: 3.3~6V
- Včetně LED indikace, používá 150mA a 3.3V
- Kompatibilní s bluetooth master moduly nebo master-slave moduly.
- Rozměry: 32x16x7mm
- Hmotnost: 2g

Modul je možné provozovat v režimu Master i Slave, je proto vhodný pro mou potřebu, kdy propojuji dva různé mikrokontrolery, v mém případě Arduino Uno a PIC18F258. Modul je možné nastavovat pomocí příkazů posílané přes sériovou komunikaci. Modul se ovšem musí přepnout do konfiguračního modu, tak jak je popsáno v datasheetu.

Keyes KY-023 joystick s tlačítkem

Modul s joystickem je podobný modulům, které jsou osazeny v kontrolérech herních konzolí. Je vybaven dvěma potenciometry, které jsou vůči sobě pootočený o 90°. Napětí na pinech modulu na potenciometrech X a Y v klidové poloze je 2,5 V a při pohybu v krajních polohách je napětí 0 – 5V v závislosti na směru. Po připojení k Arduino Uno je možno číst v klidové poloze hodnotu 512 a v krajních polohách 0 a 1023.



Obrázek 20 Joystick Keyes KY-023

3.1.2 Programové prostředky

Do programových prostředků jsem zahrnul všechny komponenty, které se týkají programové části projektu, tedy vývojová prostředí, programátor mikrokontroleru PICkit3, simulátor atd.

Programátor PICkit 3

PICkit 3 je levný, jednoduchý in-circuit debugger/programátor ovládaný pomocí PC prostřednictvím MPLAB X IDE. Je součástí vývojového balíku firmy Microchip. Je použitelný pro vývoj softwaru a hardwaru užívající PIC a dsPIC mikrokontrolery a který je založen na In-Circuit Serial Programming rozhraní [34]. In-Circuit Serial Programming je technika programování mikrokontrolerů, které mohou být už z výroby umístěny na desce plošných spojů. Touto technikou je možno provádět update programů i v obvodech, které jsou už zapojeny a pracují [35]. Základní vlastnosti PICkit3 jsou:

- Podpora Full-Speed USB ovladačů
- Vykonávání příkazů v reálné čase
- Podpora nejvyšších frekvencí mikrokontrolerů
- Vestavěný monitor zkratu
- Podpora nízkých napětí (rozsah 1,8 – 5 V)
- LED pro diagnostiku
- Mazání všech typů pamětí s potvrzením
- Zastavení periférií při přerušení

Na obrázku 21 jsou znázorněny funkční prvky programátoru.



Obrázek 21 PICkit 3 [43]

MPLAB X IDE

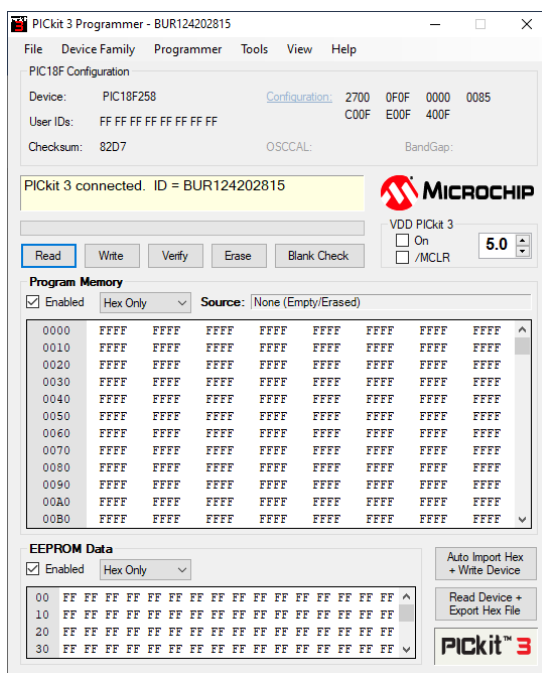
Jedná se o vývojové prostředí, které je vyvinuto firmou Microchip a poskytuje ho zdarma. Je určeno pro vývoj aplikací na všech produktech této firmy. Software je doplněn o propracovanou nápovědu a velkou výhodou jsou příklady použití, které je možné nalézt na stránkách Microchip. IDE je možné používat ve webové verzi, nebo je možné ho stáhnout a nainstalovat. Vybral jsem si verzi pro nainstalování. Po otevření nainstalovaného softwaru a volbě Nový projekt se objeví průvodce, který pomocí voleb nastaví projekt do požadovaného nastavení pro programování aplikace. Je nutné zadat typ mikrokontroleru, typ programátoru, typ kompilátoru atd. Poté se otevře prostředí a je možné zapsat kód aplikace. Jazyk kódu může být assembler, nebo jazyk C, záleží na volbě kompilátoru. Do kódu je potřeba vložit sekvenci s určením konfiguračních bitů. Následně se provede příkaz Build a jestliže je kód v pořádku, je možno nahrát program do mikrokontroleru prostřednictvím zvoleného programátoru. Je možné také sestavit projekt z HEX kódu, který byl kompilován v jiném programu.

Tento software jsem použil pro programování v jazyce assembler a testování programů pro PIC16F84 a PIC16F1705. Testovací příklady jsem použil z katedrálních stránek a z blogu AllComp [36]. Díky těmto příkladům se mi podařilo pochopit základy programování v jazyce assembler. V jazyce C jsem v tomto programu nepracoval, protože jsem nenašel vhodnou příručku a podle příkladů v programu MPLAB se mi programování jevílo jako komplikované, například program MikroC mi přišel mnohem vhodnější pro programování v jazyce C než MPLAB [37].

PICkit 3 tool

Pro nahrání programu ve formátu hex je možné použít i nástroj, který je po nastavení programátoru možno použít místo prostředí MPLAB X. Nástroj už není podporován, lze ho ale nalézt ve webovém archivu firmy Microchip. Užití nástroje je mnohem jednodušší než zakládání projektu ve vývojovém prostředí. Nástroj podporuje širokou škálu mikrokontrolerů včetně těch, které

jsem použil při svém projektu. Na obrázku 22 je základní obrazovka programu. Ovládání je jednoduché a dobře popsané v nápovědě.



Obrázek 22 Obrazovka PICkit3 tool

Bluetooth komunikace

Komunikace Bluetooth je otevřený standard vyvinutý firmou Ericsson pro bezdrátovou komunikaci různých zařízení. Komunikaci definuje standard IEEE802.15.1. Je možno používat několik verzí, které se liší hlavně rychlostí přenosu a dosahem signálu. Specifikace Bluetooth 2.0 EDR (Enhanced Data-Rate) značně vylepšuje párování mezi dvěma zařízeními.

CAN komunikace

Komunikace mezi úrovněmi zajišťuje komunikace typu CAN. Jde o komunikační protokol vyvinutou firmou Robert Bosch, používanou nejčastěji pro komunikaci se senzory a řídicími jednotkami. Elektrické parametry fyzické vrstvy jsou definovány podle ISO 11898. Teoretická rychlost je až 1 Mbit/s do vzdálenosti až 40 metrů. Při snížení rychlosti na 125 kbit/s lze komunikovat na vzdálenost až 500 metrů.

Mikrokontroler PIC18F258 je vybaven modulem pro komunikaci pomocí CAN sběrnice a deska, na které je mikrokontroler osazen, je vybavena obvodem MCP2551 a rezistorem 120 ohm. Pro přenos informací pomocí CAN se musí provést konfigurace v programu mikrokontroleru. K samotné inicializaci v prostředí MikroC je možné použít pomocný program CANculator, ve kterém se provede inicializace podle požadovaných parametrů komunikace a inicializační proměnné je

možné kopírovat do programu. Pro samotný kód pro CAN komunikaci slouží příklad z nápovědy CAN knihovny [38].

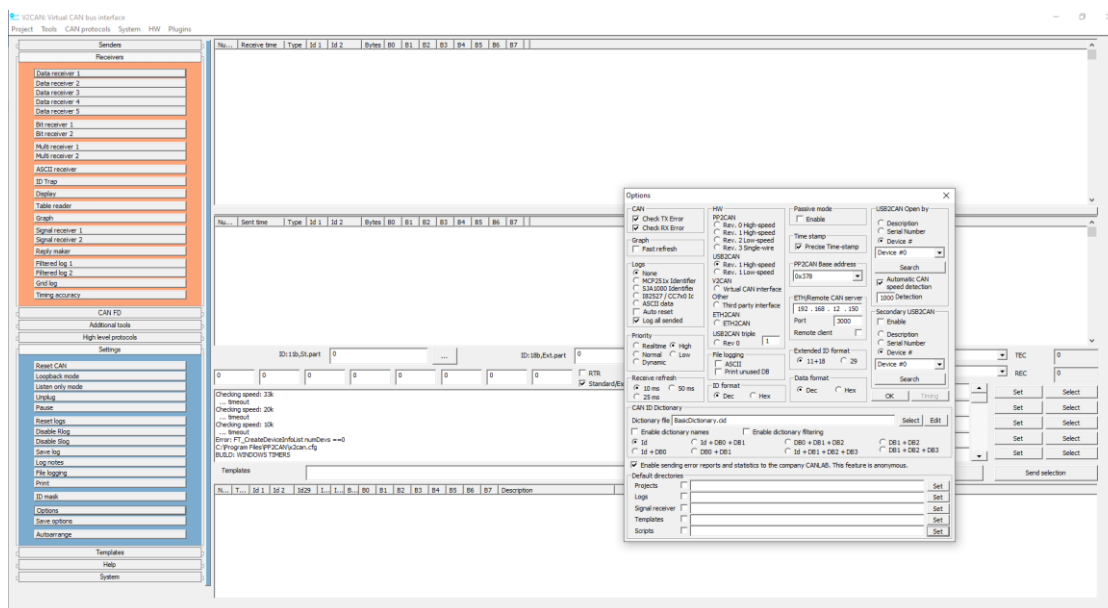
USB2CAN a PP2CAN

PP2CAN je diagnostický software české firmy CANLAB, který využívá komunikační adaptér USB2CAN od téže firmy. CANLAB se zabývá především vývojem softwaru a hardwaru pro sběrnici CAN. Adaptér je k dispozici ve dvou verzích a to High-speed a Low-speed. USB komunikace adaptéru je založena na obvodu firmy FTDI, CAN komunikace je umožněna obvodem SJA1000 a dále je v adaptéru mikrokontroler rodiny PIC 18, zajišťující chod adaptéru. Na obrázku 23 je vyobrazen adaptér USB2CAN [39].



Obrázek 23 Adapter USB2CAN [39]

Pomocí adaptéru dokáže software PP2CAN monitorovat data na sběrnici CAN. Software je určen jak pro monitoring, tak i vývoj aplikací využívající sběrnici CAN a obsahuje velké množství nástrojů, které práci ulehčují jako například automatické odesílání zpráv, filtrace, logování atd. Pomocí tohoto softwaru jsem schopen zadávat příkazy jako mikrokontroler na úrovni 1 a monitorovat komunikaci mezi úrovní 0 a 1, využil jsem tedy jen základní funkce tohoto programu. Úvodní obrazovka je na obrázku 24.



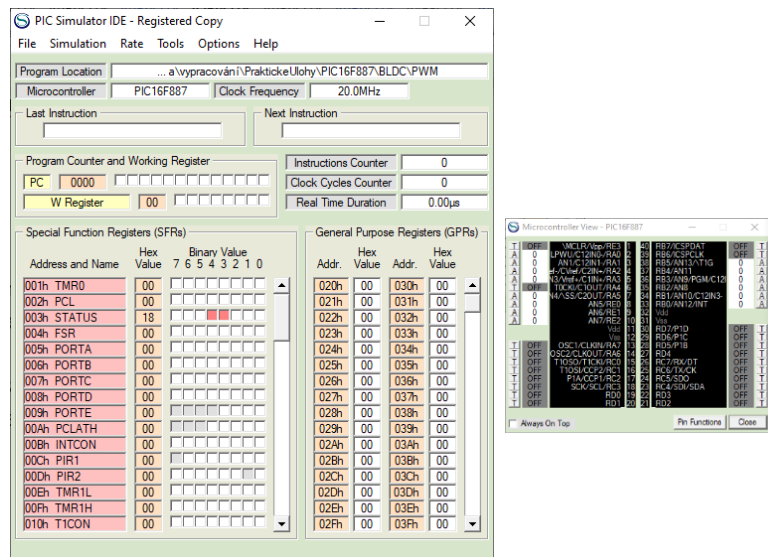
Obrázek 24 Obrazovka PP2CAN

Programové prostředí MikroC pro PIC.

MikroC je programové prostředí, ve kterém realizuji ovládací programy pro mikrokontrolery jak z úrovně nula, tak úrovně 1. Programové prostředí obsahuje potřebné knihovny PWM a CAN, které jsem využil při programování. Jsem zde schopen nastavovat potřebné registry pro ovládání přerušení. Omezením je délka programů ve free verzi. V nápovědě prostředí existuje mnoho příkladů, které je možné použít po úpravě na mikrokontroler PIC18F258 [40].

PIC18 Simulator IDE

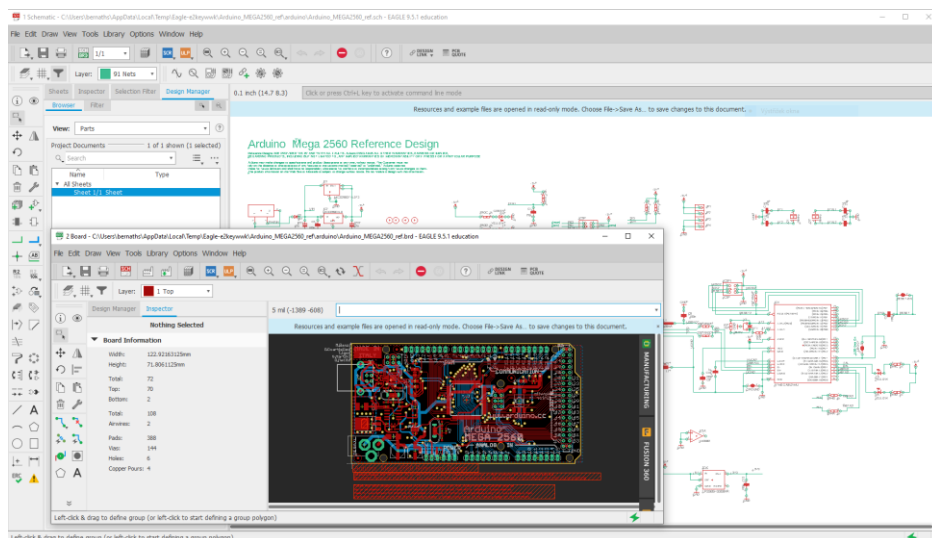
Simulátor jsem používal pro ověření funkčnosti programu, pro tento účel je v programu velké množství nástrojů, které mi umožňují ověřit si nastavení například registrů. Free verze je bohužel omezena počtem spuštění a maximální dobou jednoho spuštění. Pro můj projekt je počet spuštění dostatečný. Simulátor se pro mě stal takřka nepostradatelný, ušetřil mi spoustu času při hledání správného nastavení registrů a při odstraňování chyb. Program výborně ilustruje postup načítání programu, včetně indikace stavů registrů, stavu pinů a mnoho dalšího. Na obrázku 25 je jeho základní obrazovka s přidanou funkcí pro sledování stavu pinů [41].



Obrázek 25 Obrazovka PIC Simulátoru

Autodesk Eagle

Eagle je komplexní program pro tvorbu elektronických obvodů. Obsahuje modul pro tvorbu elektronických schémat, modul pro návrh desek plošných spojů a další nástroje, které jsou určeny například pro kontrolu zapojení atd. Program je pro studenty zdarma v omezené verzi. Na obrázku 26 jsou okna zobrazující prostředí programu [42].



Obrázek 26 Obrazovka Eagle

V programu jsem vytvořil celkové schéma zapojení a schéma pro výrobu PCB silové části. V modulu pro PCB jsem vytvořil návrh PCB, podle kterého PCB silové části vyrobím.

Programové prostředí Arduino IDE

Jedná se o software typu open-source, je zdarma ke stažení a je velmi dobře vybaven nápovědou a příklady k použití. Pro psaní kódu je určen textový editor s pokročilými funkcemi, pro komunikaci s hardwarem je vybaven monitorem sériové komunikace. Uživatel zde nalezne manažera knihoven, příkazovou lištu s nejběžnějšími příkazy a kompilátor. Prostředí je velmi oblíbené a rozšířené. Na obrázku 27 je znázorněno otevřené prostředí.



Obrázek 27 Prostředí Arduino IDE

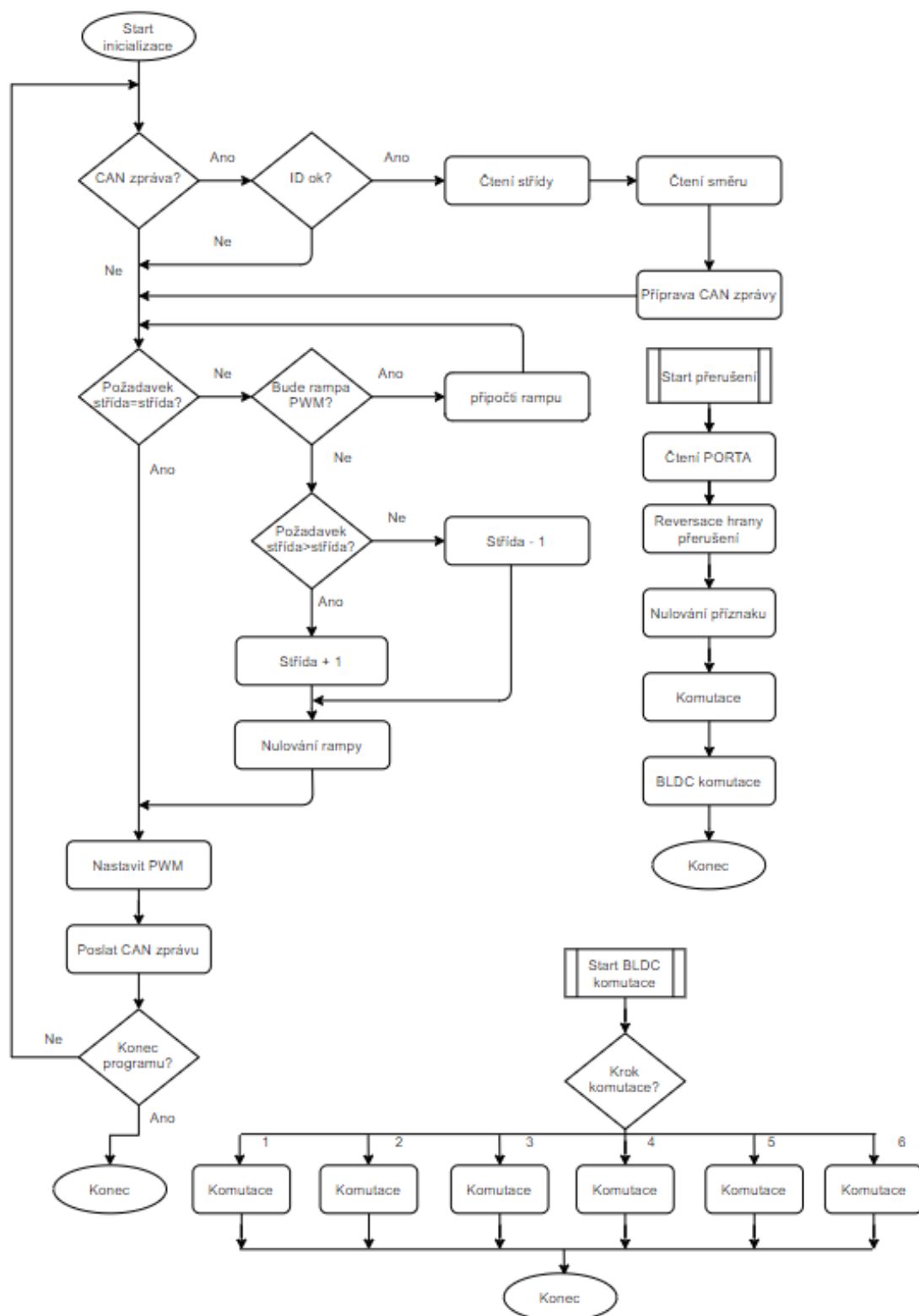
3.2 Praktická realizace ovládání dvou BLDC motorů

Při realizaci jsem vycházel ze schématu zobrazeném na obrázku 17. Předpokládal jsem, že hlavním úkolem bude sestavení funkční silové části, kterou poté budu modifikovat pro mé účely. Pomocí řešerše dříve zpracovaných diplomových prací a jiných zdrojů jsem si ověřil vhodnost součástek. Součástky využitě v zapojení silové části jsem popsal v předchozí kapitole. Postup při realizaci lze rozdělit do několika fází, které povedou ke konečnému výsledku, což je sestavení dálkově ovládané trojkolky. První fáze zahrnuje realizaci úrovně 0, to znamená silové elektroniky, její ovládání mikrokontrolerem a implementaci komunikace. Ve druhé fázi sestavím úroveň 1, skládající se z mikronroleru s programem pro rozdělení příkazů k otáčení kol podle požadavku uživatele a v poslední, třetí fázi, sestavím dálkový ovladač, kterým bude trojkolka ovládána.

3.2.1 Realizace řízení nejnižší úrovně 0

V této fázi jsem tedy nejprve realizoval silový obvod ze schéma na obrázku 17 za pomoci mikrokontroleru PIC 16F887 na jednoduchém BLDC motoru bez hallových sond a na vývojovém poli. Po úspěšném odzkoušení a porovnání s komerčním výrobkem jsem program ovládání modifikoval pro motor s hallovými sondami, kdy hallové sondy generují informaci o poloze motoru. Zároveň jsem využil změnu hodnoty polohy ke generování přerušení typu interrupt on change a obsluze komutace.

Musel jsem ale přenést ovládání na mikrokontroler PIC 18F258. Tento mikrokontroler ovšem nemá stejný počet vývodů a proto jsem byl nucen upravit program pro jiný typ přerušení. Za pomoci vedoucího práce jsem sestavil elektronický obvod, který generuje logické úrovně opačné vůči předchozímu stavu při každé změně stavu hallových sond. Logickou úroveň jsem přivedl na pin přerušení INTO. V obsluze přerušení poté dochází k přečtení stavu hallových sond a na základě toho dojde ke kroku komutace. Do programu jsem přidal také část pro změnu střídy PWM, čili rychlosti otáčení kola, pomocí rampy, která slouží jako bezpečnostní prvek zabráňující okamžitému přepnutí směru otáčení, což by mohlo vést ke zničení elektroniky. V programu je dále zahrnuta komunikace CAN, ale pro sekci CAN declaration je nutné znát správné nastavení. Pro nastavení firma MikroE poskytuje nástroj CANculator, který správnou deklaraci proměnných vypočítá. Ukázalo se však, že CAN komunikace na tomto mikrokontroleru blokuje využití časovače, který jsem hodlal použít pro výpočet aktuální rychlosti otáčení kola. Níže je uveden obrázek 28 vývojového diagramu pro tuto fázi vývoje.



Obrázek 28 Vývojový diagram komutačního programu

Komutace samotná je prováděna na základě hodnot z hallových sond, kdy každá z hodnot představuje jednoznačnou pozici rotoru vůči statoru. Pro přenesení komutačních kroků o programu jsem používal soustavu tabulek, která je vidět na obrázku 29.

A YELLOW
B GREEN
C BLUE

FORWARD

BLDC		
A	B	C
Y	G	B
	1	0
0	1	
0		1
	0	1
1	0	
1		0

HALL		
A	B	C
Y	G	B
0	1	0
0	1	1
0	0	1
1	0	1
1	0	0
1	1	0

DEC	Program HEX	BIN
2	0x46	1 000 110
3	0x16	10 110
1	0x1C	11 100
5	0x2C	101 100
4	0x25	100 101
6	0x45	1 000 101

BACKWARD

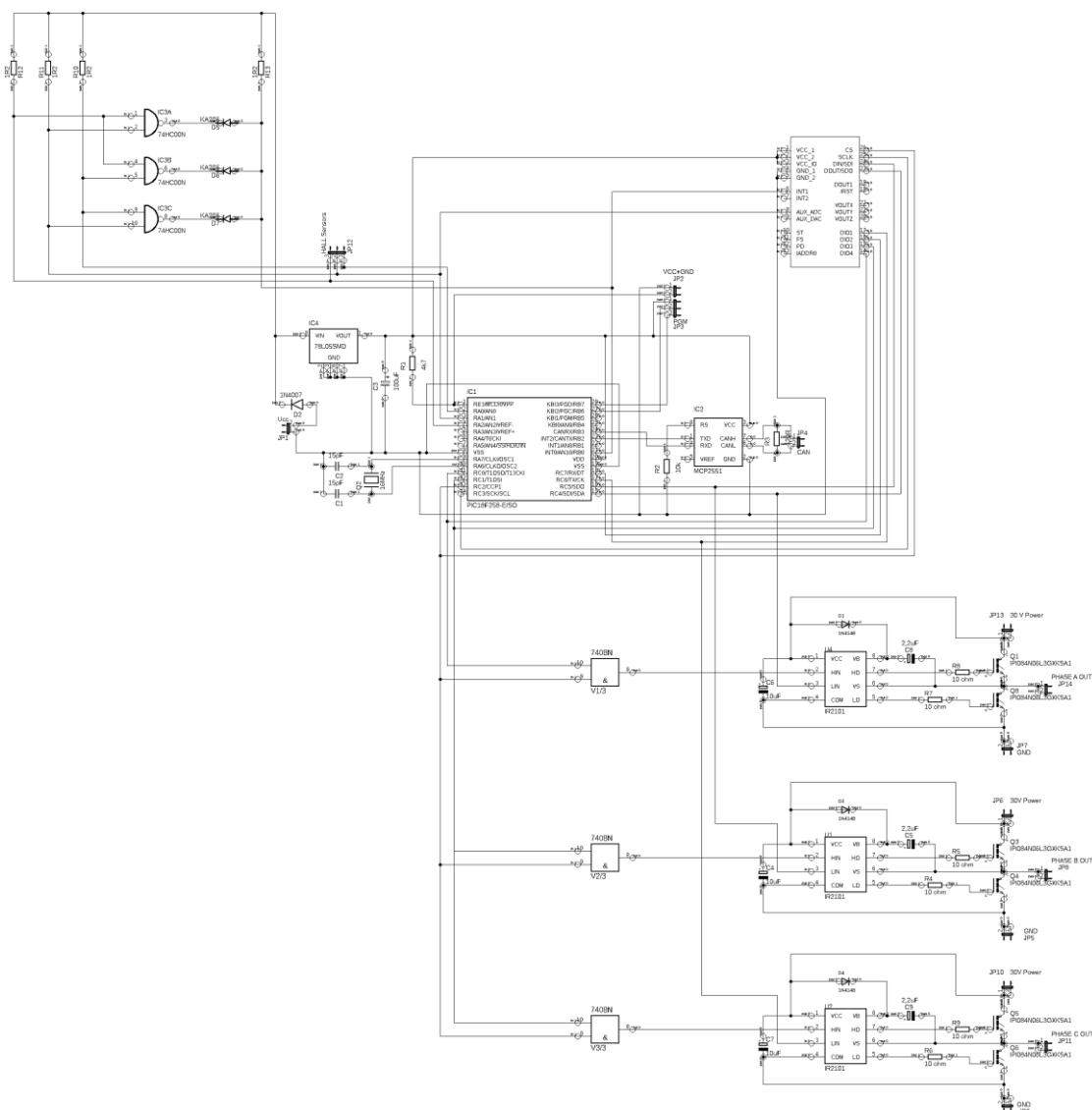
BLDC		
A	B	C
Y	G	B
	0	1
1	0	
1		0
	1	0
0	1	
0		1

HALL		
A	B	C
Y	G	B
0	1	0
0	1	1
0	0	1
1	0	1
1	0	0
1	1	0

DEC	Program HEX	BIN
2	0x2C	101 100
3	0x25	100 101
1	0x45	1 000 101
5	0x46	1 000 110
4	0x16	10 110
6	0x1C	11 100

Obrázek 29 Soustava tabulek pro komutaci

Dále je uveden obrázek 30 se schéma zapojení úrovně nula z programu EAGLE. Původní základní schéma z obrázku 17 je modifikováno na řízení BLDC motoru s detekcí polohy rotoru pomocí hallových sond o obvod detekující změnu stavu hallových sond nutnou pro komutaci. Signál o změně je poté přiveden na pin INT0, který detekuje změnu a provede přerušení s procedurou komutace. Deska plošných spojů bude vyrobena podle upraveného schéma bez mikrokontroleru.



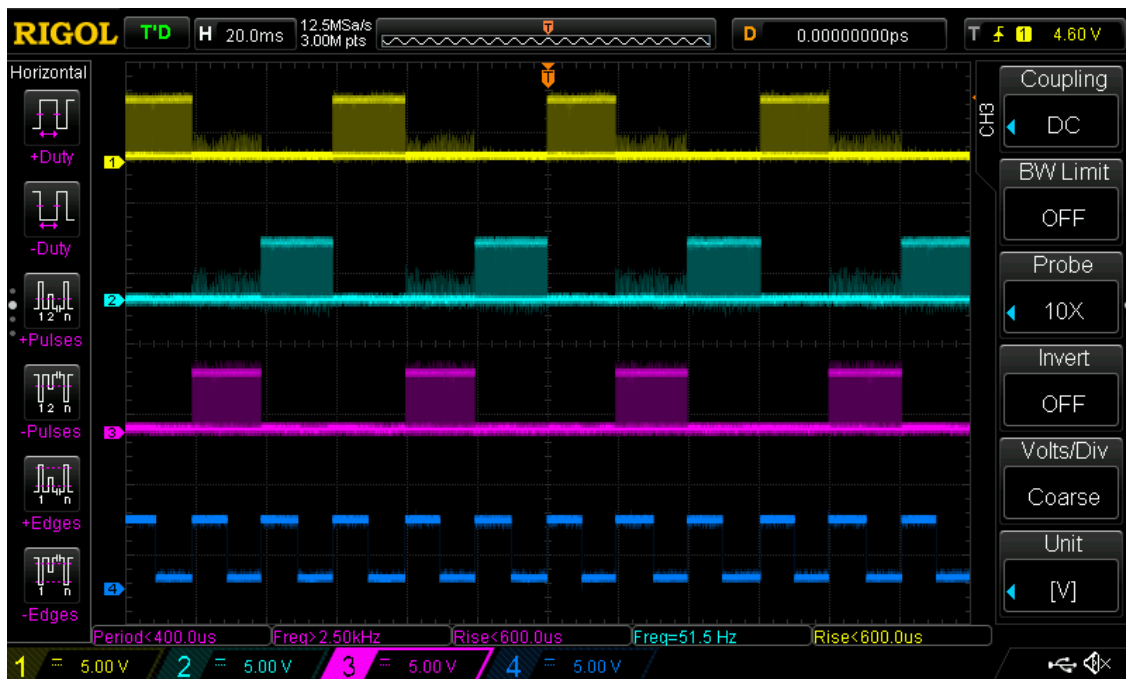
Obrázek 30 Schéma zapojení silového obvodu

Po zapojení jsem provedl test funkčnosti a měření na osciloskopu. Testovaná sestava se skládala z jednoho BLDC kola připojeného k sestavenému elektronickému obvodu. Zdrojem energie byl v testu laboratorní zdroj nastavený na 12 V s proudovým omezením na 0,5 A. Zdrojem energie pro mikrokontroler byl oddělený transformátor s výstupním napětím 5 V a s maximálním proudem 0,3 A. Získané výsledky měření odpovídají předpokladům, které jsem měl před realizací měření. Chování jednotlivých větví není identické na výstupu silového napětí, ale naměřené hodnoty nevybočují z tolerance. Pro zjištění příčin odchylek by bylo nutné provést podrobné měření, které by bylo časově velmi náročné. Chod motoru je ale hladký, proto jsem se rozhodl, že odchylky zanedbám a budu se soustředit na další postup. Uvedené odchylky jsou na obrázku 31. Měření proběhlo na pinu 1 (gate) MoSFET. Spodní modrá křivka znázorňuje signál pro přerušení na pinu mikrokontroleru INTO a tedy změnu stavu hallových sond.



Obrázek 31 Průběhy napětí na pinu Gate MOSFET

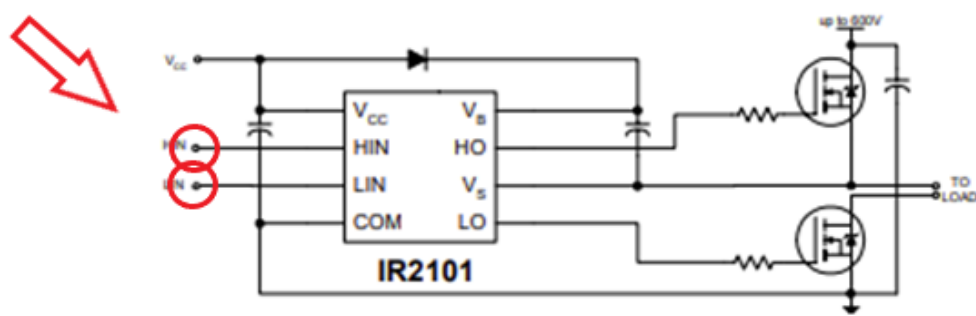
Provedl jsem měření na výstupech PORTC mikrokontroleru, abych si ověřil, jestli jsou signály generované pro komutaci podle předpokladu. Výsledek měření je na obrázku 32.



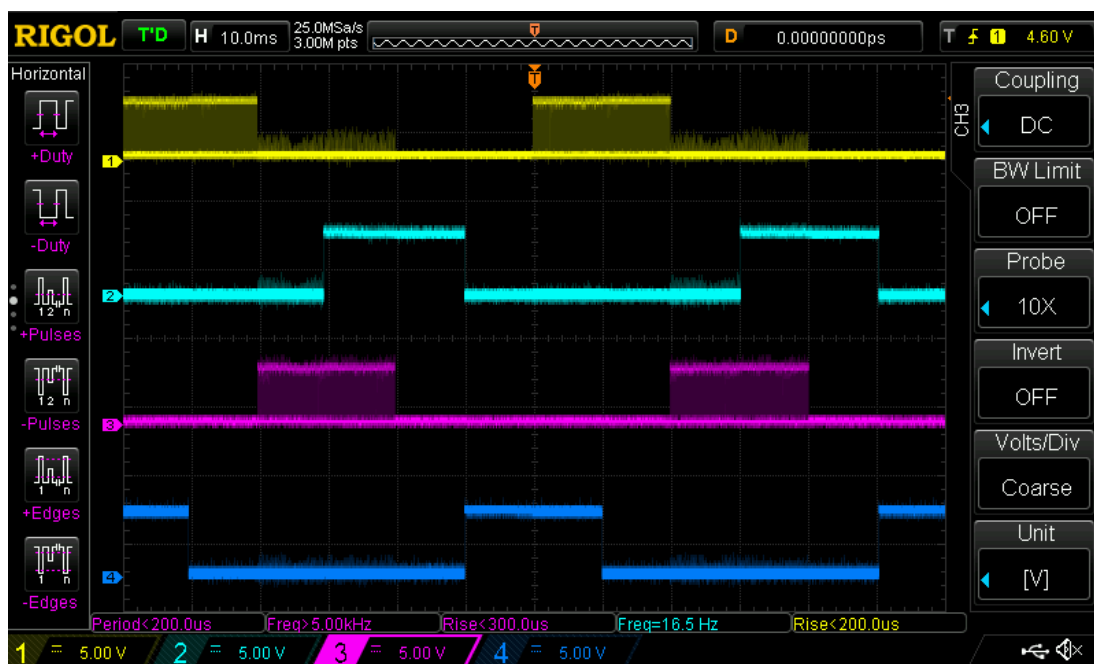
Obrázek 32 Průběh napětí na pinech mikrokontroleru

Měření bylo provedeno na vedení mezi logickým hradlem AND a gate driverem IR2101. Na prvních dvou větvích je patrné jisté PWM rušení.

Další měření jsem provedl na prvních dvou větvích na vedení k hornímu a spodnímu pinu gate driveru. Místo je naznačeno na obrázku 33. Výsledek měření je na obrázku 34.



Obrázek 33 Umístění měřicích sond



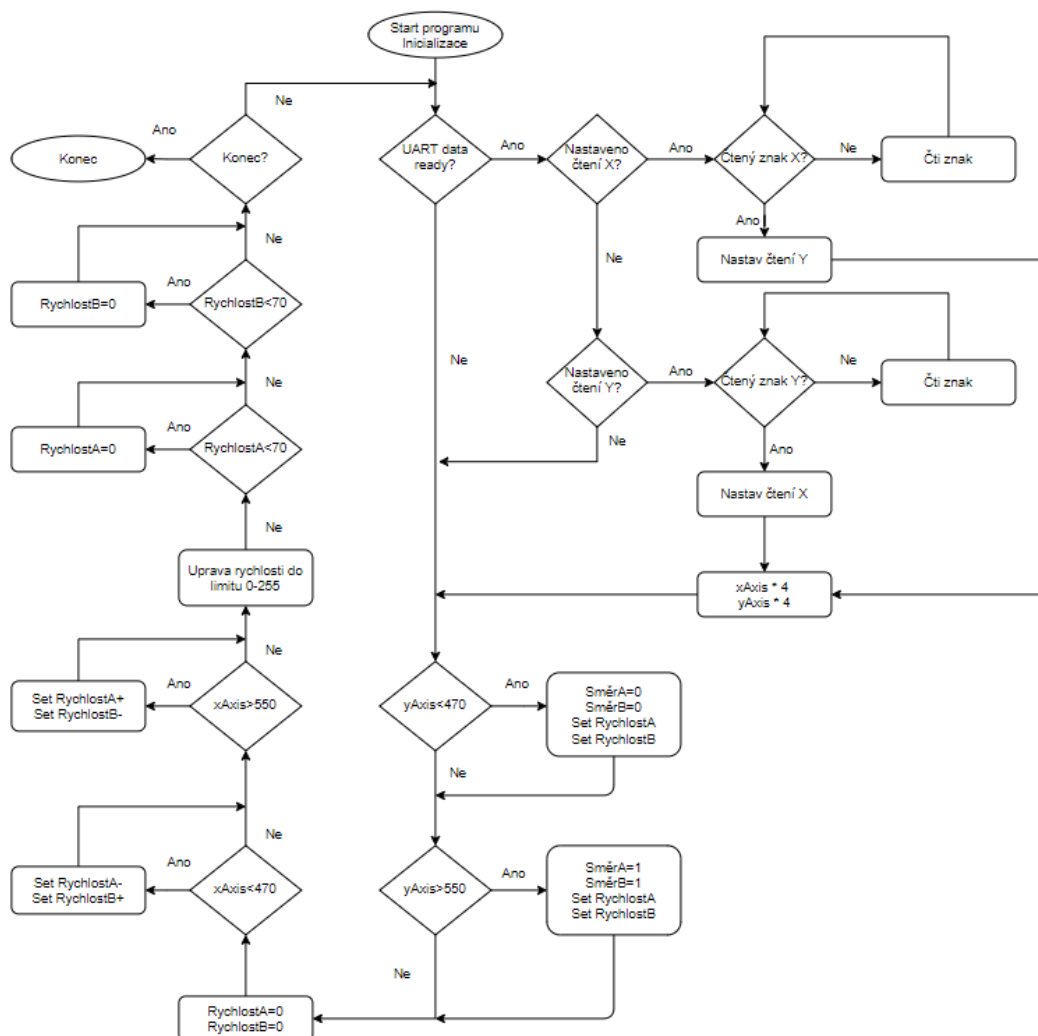
Obrázek 34 Průběhy napětí na pinech větví A a B

Na obrázku je vidět stejné rušení jako v předchozím měření. Pro nalezení příčiny by bylo nutné provést další měření. Obrázek ale odpovídá předpokladu a komutace probíhá správně, což se potvrzuje hladkým chodem motoru.

3.2.2 Realizace řídicí úrovně 1

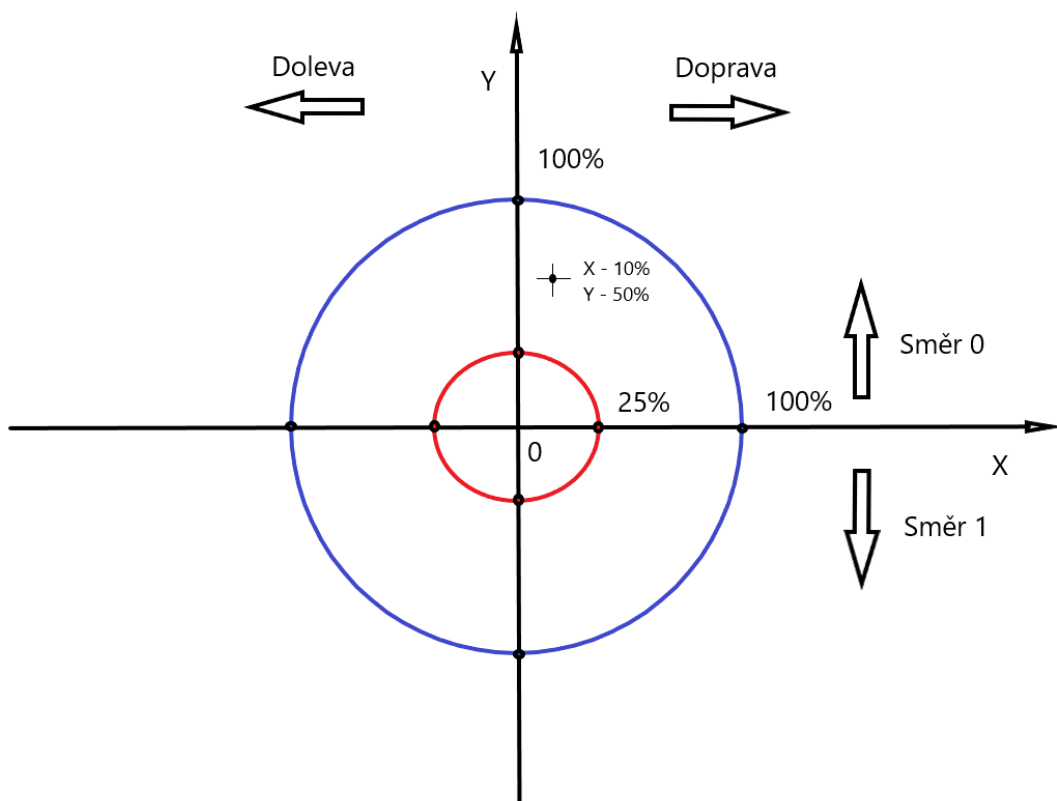
Po zvládnutí předchozí fáze jsem mohl přistoupit k realizaci další fáze, což je sestavení úrovně 1. Ta má za úkol přijímání příkazů z uživatelského rozhraní s určením směru a s požadovanou rychlostí otáčení kola, který je reprezentovaný střídou PWM. Tyto informace zpracuje a rozdělí požadavky pro každé kolo zvlášť. Dále vytvoří příkazy pro kola a odešle je pomocí CAN sběrnice na úroveň 0. Pro další využití jsem implementoval i přijetí zpětné vazby, která mikrokontroler informuje o momentálním směru kola a o realizovaném komutačním kroku. Tyto informace ale ve

své práci nevyužívám. Na obrázku 35 je znázorněn vývojový diagram, podle kterého je sestaven program nahraný v mikrokontroleru.



Obrázek 35 Vývojový diagram úrovně 1

K lepšímu pochopení algoritmu rozdělení požadavků na otáčení jsem vytvořil obrázek 36. Na něm je znázorněno, jakým způsobem je převeden požadavek zadaný z joysticku uživatelského rozhraní na příkazy pro kola.



Obrázek 36 Schematické rozložení hodnot joysticku

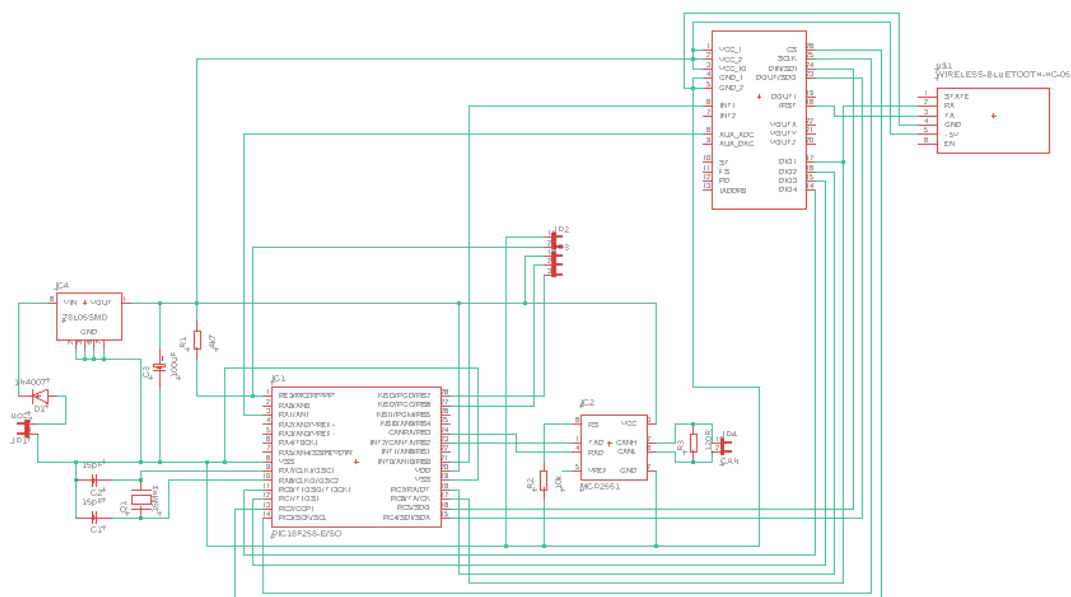
Obrázek znázorňuje pozici joysticku a hodnoty v procentech. Modrý kruh označuje maximální rozsah pohybu v procentech, červený kruh označuje hranici naprogramované necitlivosti. Tu bylo nutné zařadit, aby se předešlo reakci trojkolky na šum při snímání hodnot. Obrázek je pouze ilustrativní, ve skutečnosti dochází k přepočtu z procent na hodnoty, protože souřadný systém ve skutečnosti není uprostřed v poloze nula na obrázku. V principu je v první řadě vyhodnocena osa Y, která určuje směr a rychlost. Poté je vyhodnocena osa X určující otáčení a provede se propočet pro zvýšení otáček jednoho kola. Zde uvádím příklad pro jeden bod:

- Osa X – 10% doprava
- Osa Y – 50% směr 0

$$Strida_{Leve} = Strida_{max} \cdot H_Y + Strida_{max} \cdot H_X = 255 \cdot 0,5 + 255 \cdot 0,1 = 153 \quad (8)$$

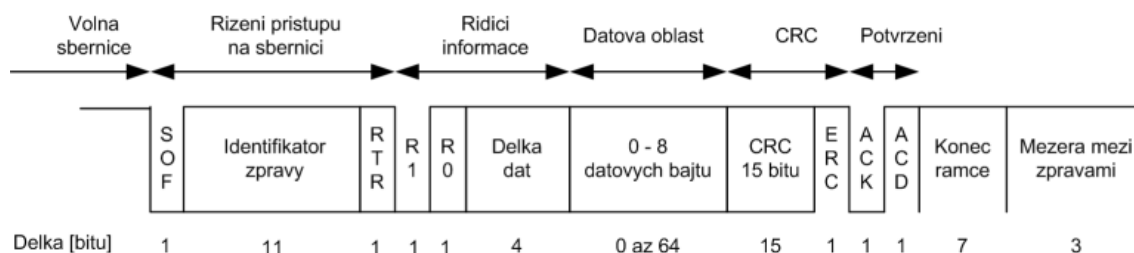
$$Strida_{Prave} = Strida_{max} \cdot H_Y - Strida_{max} \cdot H_X = 255 \cdot 0,5 - 255 \cdot 0,1 = 102 \quad (9)$$

Hodnota $Strida_{max}$ je zde maximální střída, H_X je hodnota v ose X, H_Y je hodnota v ose Y. Komponenty úrovně 1 jsou na obrázku 37. Jedná se o zapojení PIC18F258 na PCB katedry, doplněné o modul HC-05, který umožňuje komunikaci bluetooth. Ostatní potřebné vývody jsou už na PCB přístupné.



Obrázek 37 Komponenty úrovně 1

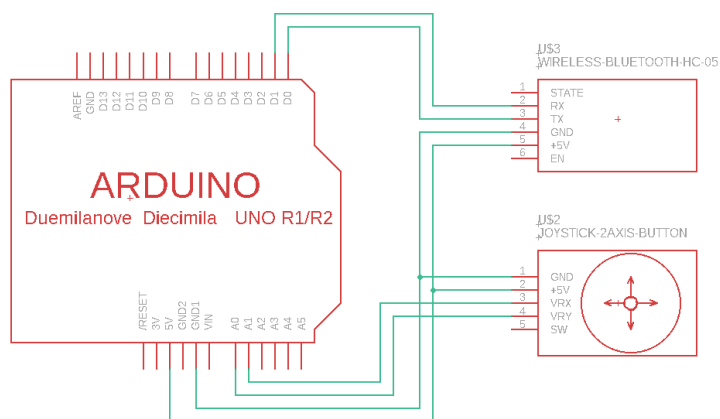
Pro komunikaci s nižší úrovní je využívána CAN sběrnice. Struktura datové zprávy je dána tabulkou 1. Pro přenos jsem si vybral standartní podobu CAN rámce. Jeho členění je na obrázku 38.



Obrázek 38 Členění CAN zprávy

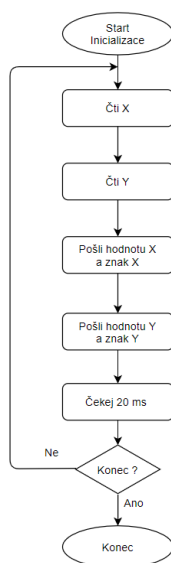
3.2.3 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní je v mém případě dálkové ovládání, skládající se z joysticku, modulu HC-05 a Arduina Uno. Všechny komponenty jsou propojeny podle schéma na obrázku 39.



Obrázek 39 Komponenty uživatelského rozhraní

Zapojením Arduina Uno do dálkového ovládání dává možnost rozšířit možnosti uživatelského rozhraní například o informační panel, který by mohl být využit pro zobrazení dalších údajů. Do Arduino Uno je nahrán jednoduchý program pro čtení hodnot analogového joysticku, jeho logika je znázorněna ve vývojovém diagramu na obrázku 40.

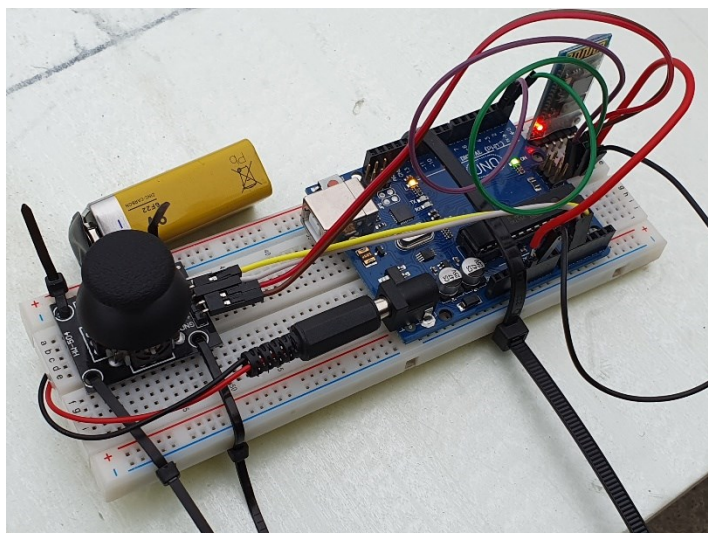


Obrázek 40 Vývojový diagram uživatelského rozhraní

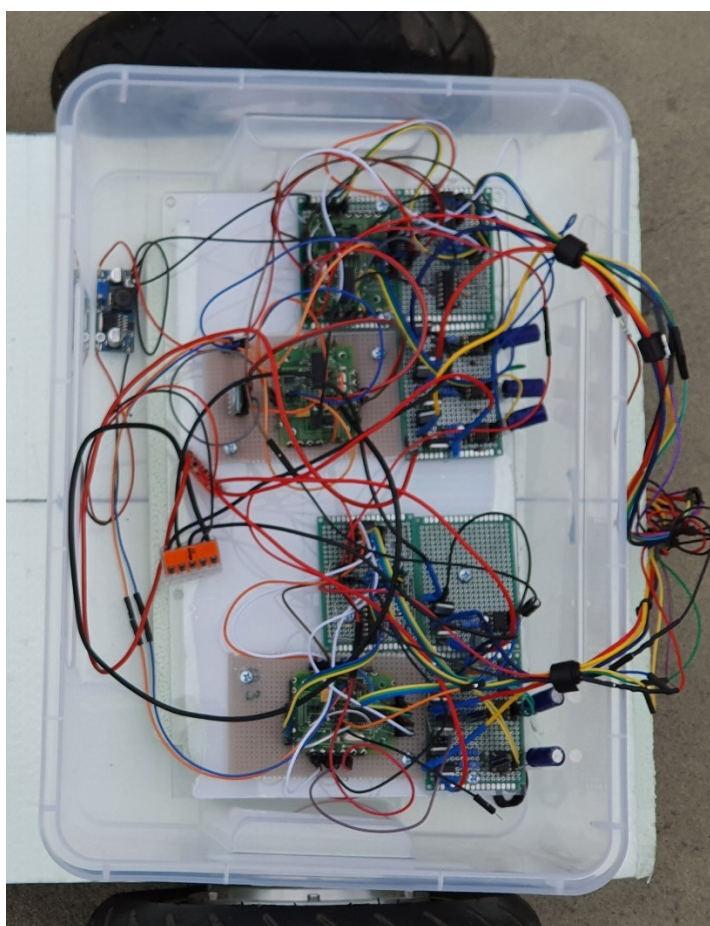
Bluetooth modul HC-05 je na tomto ovladači nastaven do modu master a modul na úrovni 1 je nastaven do modu slave.

3.2.4 Sestavení trojkolky

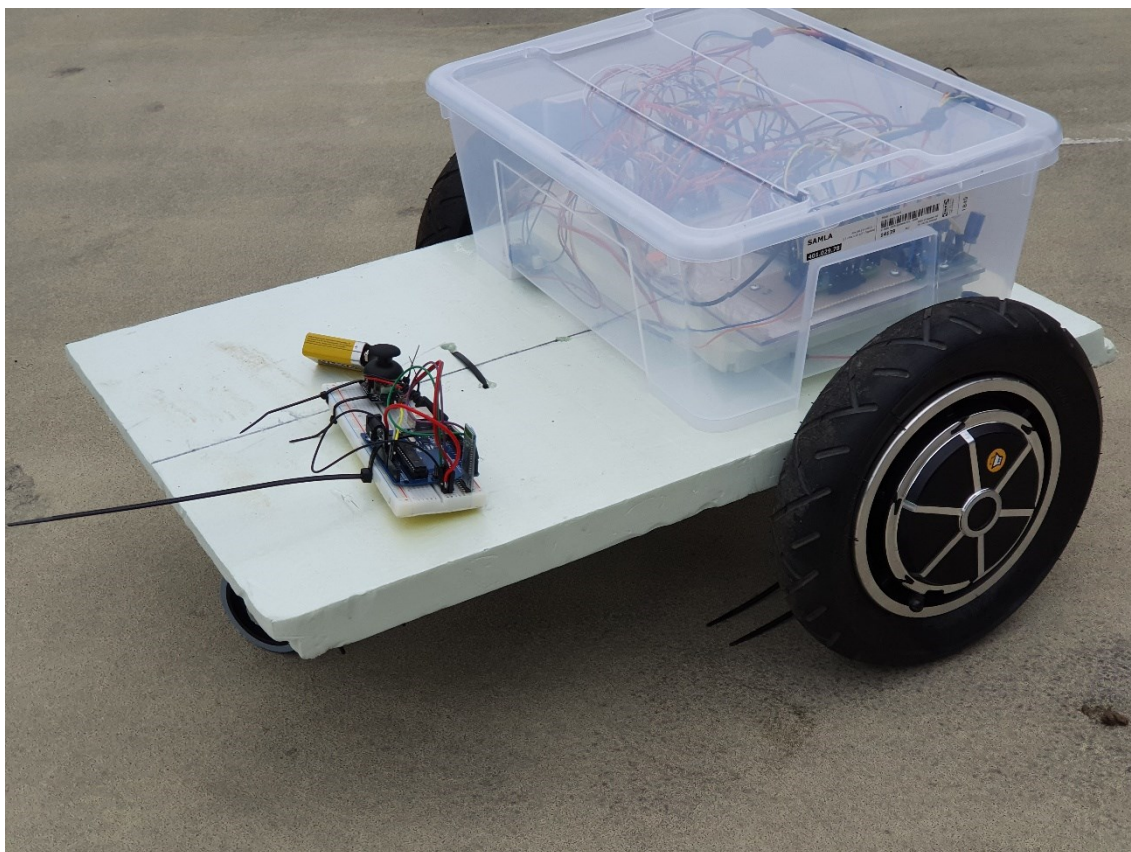
Po dokončení všech jednotlivých částí projektu jsem sestavil prototyp, který by dokázal funkčnost celku. Jedná se pouze o prototypové sestavení, proto trojkolka není schopna pohybu. Aby toho byla schopna je nutné odstranit nedostatky hlavně v upnutí BLDC motorů k ose a bezpečné upnutí baterie a elektroniky. To nebylo součástí mé diplomové práce a řešení těchto nedostatků by bylo časově náročné. Celková podoba je na následujících obrázcích.



Obrázek 41 Dálkový ovladač



Obrázek 42 Prototypová elektronika trojkolky



Obrázek 43 Sestavená trojkolka

4 Závěr

Podle zadání diplomové práce jsem měl navrhnout laboratorní úlohu, ve které by se realizovalo synchronní řízení několika BLDC motorů. Úlohu jsem rozvrhl do několika fází tak, abych byl schopen ji zvládnout v rámci celé diplomové práce. Výsledkem je tříkolové vozítko ovládané uživatelem pomocí dálkového ovládání.

V přípravné fázi jsem se seznámil s problematikou BLDC motorů, jejich konstrukcí, výhodami oproti jiným typům zejména kartáčových stejnosměrných motorů. Musel jsem se seznámit se způsoby řízení BLDC motorů, jejich omezeními i výhodami. Dále jsem v této fázi provedl rešerši zdrojů, které se zabývají problematikou BLDC motorů. Převážně jsem vycházel z diplomových a bakalářských prací na českých technických univerzitách. Spektrum prací je opravdu široké, týká se jak samotných BLDC motorů v široké škále výkonů, konstrukce elektronických obvodů pro jejich ovládání, využití BLDC motorů jako pohonných jednotek automobilů až po práce zabývající se simulací fyzikálních vlastností BLDC motorů.

Po teoretickém seznámení jsem začal pracovat na praktické části úlohy. Jako první byla konstrukce úrovně 0 řízení BLDC motorů. V počátcích mé práce jsem se rozhodoval, jestli budu realizovat silovou část sám, nebo použiji některé z komerčních řešení, které jsou na trhu k dispozici. Rozhodl jsem se nakonec pro realizaci vlastními silami a sestrojil jsem silový obvod, který mi umožňuje řízení BLDC motoru a sepsal program pro řízení komutace. Protože jsem si uvědomoval náročnost realizace silového obvodu, postupoval jsem podle příkladů, které jsem shromáždil v teoretické části práce. Pro doplnění jsem využíval i zdroje z internetu. Na začátku jsem sestrojil obvod využívající platformu Arduino, a podařilo se mi sestrojit silový obvod pro jednoduchý modelářský BLDC motor, ovšem bez detekce polohy rotoru. Dalším krokem byl přechod na mikrokontrolery PIC. Rozhodl jsem se, že budu řízení nejprve realizovat pro mikrokontroler PIC16F887, který je používán v nápovědě softwarového prostředí MikroC. Přechod z Arduino Uno na mikrokontroler PIC16F887 se mi nakonec podařil, přestože jde o velký rozdíl jak v programování, tak v dokumentaci k mikrokontroleru. Ovládání rychlosti motoru bylo prováděno čtením analogového portu pomocí potenciometru. Implementaci komunikace jsem provedl až při přechodu na mikrokontroler PIC18F258. V tomto přechodu jsem teprve realizoval CAN komunikaci. Musel jsem ale přidat elektronický obvod, detekující změnu v hodnotě hallových sond a provést změnu způsobu přerušení. Po zapojení konečné verze elektroniky jsem si ověřil funkčnost řešení na úrovni 0.

Druhá fáze diplomové práce měla za cíl realizaci vyšší úrovně řízení dvou BLDC motorů spojené do nápravy. Jako mikrokontroler byl vybrán stejný typ jako v úrovni 0 a to PIC18F258. Do jeho programu jsem musel zahrnout příjem příkazů z dálkového ovládání pomocí bluetooth modulu skrze sériovou komunikaci, jeho zpracování a rozdělení požadavků na rychlost otáčení podle algoritmu. Potřebné příkazy pro úroveň 0 jsou posílány pomocí CAN komunikace, kterou bylo nutno taky implementovat. V této fázi jsem získal poznatky o možnostech využití bluetooth komunikace, programování bluetooth modulů a dalších typů modulů, které je možno využít. V této úrovni jsem také musel vyřešit pohyb vozítka a převést jej do jazyka C.

V poslední třetí fázi jsem sestrojil dálkové ovládání, které je použito jako komunikační rozhraní pro uživatele. Sestává se pouze ze třech komponent, které jsou jednoduše propojitelné. Jako řídicí komponenta bylo vybráno Arduino Uno, do kterého je nahrán jednoduchý program pro čtení hodnot z analogového joysticku a jejich posílání do úrovně jedna. Tuto fázi můžu hodnotit jako relativně snadnou, využil jsem poznatků z bakalářské práce, kde jsem měl možnost pracovat s platformou Arduino a tak mi toto prostředí nebylo cizí.

Diplomová práce byla pro mě velice náročná. Bylo nutné zvládnout ovládání několika programů potřebných pro sestavení silové a programové části, detailní seznámení se s elektronikou obvodu a pochopení principu sestavení obvodu. Musel jsem se podrobně seznámit s technickou dokumentací k součástkám a pečlivě si ji přečíst. Velmi mnoho času jsem také věnoval programování mikrokontrolerů PIC 16F887 a PIC 18F258, seznámil jsem se s jejich datasheety, možnostmi práce s různými druhy přerušení, jejich aplikací a hlavně jejich programování, které se provádí na úrovni registrů. To vše bylo navíc komplikováno tím, že jsem měl pouze časově omezený přístup do laboratoře katedry a konzultace s vedoucím práce probíhala často jen virtuálně. Trojkolka se nakonec podařila sestavit, ale jen v základní prototypové podobě.

Pro plné a bezpečné použití je nutné prototyp dopracovat. Zde jsou některé ze směrů dalšího vývoje, kterým se práce na prototypu může ubírat. V první řadě je nutné doplnit všechny prvky ochrany uživatele a elektroniky. V diplomové práci jsem neměl prostor pro implementaci ochranných prvků, proto trojkolka není vybavena například ochranou proti přepólování napájecího napětí, chybí ochrana před nadměrným proudovým zatížením při zastavení kola, chybí ochrana před generátorovým proudem při brždění kola, chybí normované konektory pro propojení elektronických prvků a BLDC kola a to jsem zde určitě nevyjmenoval všechny ochrany, které by bylo vhodné doplnit. Dalším směrem je doplnění prototypu o funkce vhodné pro komfortnější užívání trojkolky. Užitečný by určitě byl informační displej na dálkovém ovladači, který by informoval uživatele o stavu trojkolky a parametrech, které trojkolka může poskytnout. V základní verzi je to tedy pouze směr otáčení kol a provedený komutační krok. Trojkolka se ale může doplnit o celou řadu senzorů a pak by bylo možné hodnoty senzorů zobrazovat. Jako vhodné hodnoty pro uživatele se jeví například stav nabití baterie, rychlost otáčení kol, momentální proudové zatížení, teplota v prostoru elektroniky, případně chladiče pro mosfety. To samozřejmě vyžaduje umístění vhodných senzorů a promyslet architekturu komunikace, aby nedocházelo ke ztrátě důležitých informací pro chod trojkolky. Zajímavé by rovněž byla možnost rekuperace generátorového proudu do baterie. Trojkolku je tedy možné podstatně vylepšit.

Závěrem musím konstatovat, že zpracování diplomové práce bylo sice velmi náročné, ale umožnilo mi získat opravdu velké množství znalostí, které mám v plánu využít při následujících soukromých projektech, které mně napadly v průběhu realizace diplomové práce.

5 Bibliografie

1. NOVÁK, Petr. *Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Robotika. ISBN 80-730-0141-1.
2. THURMONDRONG, . WHAT ARE THE DIFFERENCES BETWEEN BRUSHED AND BRUSHLESS MOTOR FOR NEW RC HOBBYIST?. [Http://thurmondrong.bloggersdelight.dk/](http://thurmondrong.bloggersdelight.dk/) [online]. [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <http://thurmondrong.bloggersdelight.dk/what-are-the-differences-between-brushed-and-brushless-motor-for-new-rc-hobbyist/>
3. ČERNÝ, Jan. *Mikrokontrolérem řízený regulátor třífázového BLDC motoru*. Praha, 2015. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Tomáš Teplý.
4. PADMARAJA YEDAMALE, . *Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals: AN885* [online]. Microchip Technology Inc., , 20 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>
5. GIOVANNI, . The basics of electric power: Brushless motors. <Http://www.rclab.info/> [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <http://www.rclab.info/2014/01/the-basics-of-electric-power-brushless.html>
6. WILSON, Dave. *Motor control compendium* [online]. , 221 [cit. 2019-06-15]. Dostupné z: http://www.ti.com/download/trng/docs/c2000/TI_MotorControlCompendium_2010.pdf
7. NEBORÁK, Ivo. *Modelování a simulace elektrických regulovaných pohonů*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002. ISBN 80-248-0083-7.
8. LEPKOWSKI, Jim. *Motor Control Sensor Feedback Circuits* [online]. Chandler, AZ: Microchip Technology Inc., 2003, , 18 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00894a.pdf>
9. COLLINS, Danielle. What are Hall effect sensors and what is their role in dc motors?. *Www.motioncontroltips.com* [online]. 2017 [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-hall-effect-sensors-and-what-is-their-role-in-dc-motors/>
10. HONEYWELL, . *How to select Hall-effect sensors for brushless dc motors* [online]. 2012, , 4 [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://www.mouser.com/pdfdocs/Selecting-Hall-Effect-for-DC-Brushless-Motors.pdf>
11. AMCI, . Analog Encoders. *Amci.com* [online]. [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://www.amci.com/plc-automation-products/position-sensing/rotary-sensors/rotary-encoders/analog-encoders/>
12. COLLINS, Daneille. Resolver versus encoder — what's the difference?. *Www.motioncontroltips.com* [online]. [cit. 2020-02-22]. Dostupné z: <https://www.motioncontroltips.com/faq-why-are-so-many-designers-replacing-resolvers-with-encoders/>

13. BAASCH, Anna, Elisabeth LEMOS, Felipe STEIN, Aleksander PATERNO, Jose DE OLIVEIRA a Ademir NIED. Resolver-to-digital conversion implementation — A filter approach to PMSM position measurement. *2011 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. IEEE, 2011, , 1-6. ISBN 978-1-4244-9845-1. Dostupné z: doi:10.1109/PowerEng.2011.6036445
14. KIRCHNER, Tomáš. *VÝROBA A IMPLEMENTACE ENKODÉROVÉ JEDNOTKY* [online]. Brno, 2018 [cit. 2019-03-29]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=172421. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Tomáš Spáčil.
15. TEXAS INSTRUMENTS, . LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. *Texas Instrument* [online]. Dallas, Texas, 1999 [cit. 2019-03-31]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>
16. ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-010-2057-6.
17. AKIN, Bilal a Manish BHARDWAJ. Sensorless Field Oriented Control of 3-Phase Induction Motors. *Www.ti.com* [online]. [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/sprabp8/sprabp8.pdf>
18. FREESCALE SEMICONDUCTOR, . *Sine Voltage Powered 3-Phase Permanent Magnet Motor with Hall Sensor* [online]. Rožnov pod Radhoštěm, 2002, , 20 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2357.pdf>
19. ATMEL, . *Sinusoidal driving of 3-phase permanent magnet motor using ATtiny261/461/861* [online]. San Jose, CA, 2007, , 24 [cit. 2019-03-30]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/doc8030.pdf>
20. JIANWEN SHAO, , D. NOLAN a T. HOPKINS. A novel direct back EMF detection for sensorless brushless DC (BLDC) motor drives. *APEC. Seventeenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Cat. No.02CH37335)* [online]. IEEE, 2002, , 33-37 [cit. 2019-04-02]. ISBN 0-7803-7404-5. Dostupné z: doi:10.1109/APEC.2002.989224
21. KRIŽAN, Jakub. *Bezsenzorové řízení BLDC motoru*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Robert Grepl, Ph.D.
22. GAMAZO-REAL, José, Ernesto VÁZQUEZ-SÁNCHEZ a Jaime GÓMEZ-GIL. Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends. *Sensors* [online]. 2010, **10**(7), 47 [cit. 2019-04-01]. ISSN 1424-8220. Dostupné z: doi:10.3390/s100706901
23. SCHMID, Dietmar. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. Praha: Europa - Sobotáles, 2005. ISBN 80-867-0610-9.
24. XIAO, Perry. *Designing embedded systems*. Wiley, 2018, 344 s. ISBN 9781119364016.

25. SIMPLE PROJECT. Brushless DC motor control with PIC16F887 microcontroller. *<https://simple-circuit.com>* [online]. 2018 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://simple-circuit.com/pic16f887-sensorless-brushless-motor-control/>
26. MICROCHIP. PIC18FXX8 Data Sheet. *<http://www.microchip.com>* [online]. 2006 [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/41159e.pdf>
27. INFINEON. Data Sheet No. PD60043 Rev.O IR2101. *<https://www.infineon.com/>* [online]. 2004 [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-ir2101-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462533600a4015355c7a755166c
28. DUNN, Jamie. Determining MOSFET Driver Needs for Motor Drive Applications. *<http://ww1.microchip.com>* [online]. [cit. 2020-12-31]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/00898a.pdf>
29. NEXPERIA. 74HC00; 74HCT00: Datasheet [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: https://cz.mouser.com/datasheet/2/916/74HC_HCT00-1318972.pdf
30. TEXAS INSTRUMENTS. QUADRUPLE 2-INPUT POSITIVE-AND GATES [online]. [cit. 2021-05-09]. Dostupné z: <https://www.ti.com/lit/gpn/sn74s08>
31. VISHAY. 1N4148 datasheet. *<https://www.vishay.com/>* [online]. 2017 [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: <https://www.vishay.com/docs/81857/1n4148.pdf>
32. INFINEON. IPB081N06L3 G IPP084N06L3 G IPI084N06L3 G datasheet. *<https://www.infineon.com/>* [online]. Munich, Germany, 2012 [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IPP_B_I_084N06L3-DS-v02_24-en.pdf?fileId=db3a30433ba77ced013bade4048934ce
33. ADAMS, Jonathan. Bootstrap Component Selection For Control IC's. In: *<http://www.irf.com/>* [online]. El Segundo, CA, USA: International Rectifier, 2001 [cit. 2021-01-03]. Dostupné z: <http://www.irf.com/technical-info/design/tp/dt98-2.pdf>
34. MICROCHIP. PICkit™ 3 In-Circuit Debugger/Programmer User's Guide. In: *<https://www.microchip.com>* [online]. 2013 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/51795B.pdf>
35. MICROCHIP. In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™) Guide. In: *<http://www.microchip.com>* [online]. 2003 [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/30277d.pdf>
36. TRÁVNÍČEK, Samuel. PIC programování. *<https://blog.allcomp.cz>* [online]. [cit. 2020-02-23]. Dostupné z: <https://blog.allcomp.cz/pic-programovani-1-dil/>
37. MICROCHIP. MPLAB® X Integrated Development Environment (IDE). *<https://www.microchip.com>* [online]. 2021 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/development-tools-tools-and-software/mplab-x-ide>
38. POLÁK, Karel. Sběrnice CAN. *Elektrorevue* [online]. Brno, 2003 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/03021/index.html>

39. CANLAB. USB2CAN. *CANLAB* [online]. Brno [cit. 2021-01-02]. Dostupné z: http://www.canlab.cz/cs/usb2can_interface
40. MIKROE. MikroC PRO for PIC. *Https://www.mikroe.com* [online]. 2020 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.mikroe.com/mikroc-pic>
41. OSHONSOFT. PIC SIMULATOR IDE. *Https://www.oshonsoft.com* [online]. [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.oshonsoft.com/pic.html>
42. AUTODESK. Eagle. *Https://www.autodesk.com* [online]. 2021 [cit. 2021-01-15]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/overview?plc=F360&term=1-YEAR&support=ADVANCED&quantity=1>
43. ROBU.IN. PICkit3 Debugger Programmer Emulator Controller Development Board. *Https://robu.in/* [online]. [cit. 2021-01-08]. Dostupné z: <https://robu.in/product/pickit3-pic-kit3-debugger-programmer-emulator-controller-development-board/>